

博士論文

塗装による熱処理木材の耐候性向上

(Improvement of the weatherability of heat-treated wood by coating)

村井 まどか

目次

第1章 序論	1
1.1 緒言	1
1.2 既往の研究	3
1.2.1 木材の熱処理に関する研究	3
1.2.2 熱処理木材の耐候性に関する研究	4
1.2.3 熱処理木材の塗装に関する研究	4
1.3 本論文の構成	4
第2章 促進耐候性試験における熱処理木材の表面割れの形態的解析	6
2.1 はじめに	6
2.2 実験方法	6
2.2.1 試料	6
2.2.2 促進耐候性試験	6
2.2.3 画像処理による表面割れの解析	7
2.2.4 電子顕微鏡による表面観察	9
2.2.5 電子顕微鏡による断面観察	9
2.2.5 膨潤率の測定	10
2.2.6 平衡含水率の測定	10
2.3 結果と考察	11
2.3.1 画像処理による表面割れの解析	11
2.3.2 表面観察	13
2.3.3 断面観察	16
2.4 まとめ	20
第3章 熱処理木材の光変色における波長依存性	21
3.1 はじめに	21
3.2 実験方法	21
3.2.1 試料	21
3.2.2 分光照射試験	21
3.2.3 測色	22
3.2.4 赤外分光分析	23
3.2.5 全光線反射率測定	23
3.3 結果と考察	23
3.4 まとめ	26
第4章 木材保護塗料を用いて塗装した熱処理木材の耐候性能	27

4.1 はじめに	27
4.2 塗装した熱処理木材の表面分析	27
4.2.1 実験方法	27
4.2.1.1 試料	27
4.2.1.2 電子顕微鏡による表面観察	28
4.2.1.3 表面粗さ測定	28
4.2.1.4 赤外分光分析法	29
4.2.2 結果と考察	29
4.2.2.1 塗装前の無処理木材と熱処理木材の比較	29
4.2.2.2 塗装時の無処理木材と熱処理木材の比較	32
4.2.2.3 塗装後の無処理木材と熱処理木材の比較	32
4.2.2.4 赤外分光分析による定量	33
4.3 塗装した熱処理木材の耐候性能評価	37
4.3.1 実験方法	37
4.3.1.1 試料	37
4.3.1.2 屋外暴露試験	38
4.3.1.3 測色	38
4.3.1.4 撥水度測定	39
4.3.1.5 マイクロスコープによる表面観察	39
4.3.1.6 表面粗さ測定	39
4.3.2 結果と考察	40
4.3.2.1 色の変化	40
4.3.2.2 撥水度の変化と表面観察	43
4.3.2.3 表面粗さの変化	46
4.4 まとめ	51
第5章 熱処理木材の塗装における塗膜の機械的性質と表面割れの関係	53
5.1 はじめに	53
5.2 実験方法	53
5.2.1 木材の熱処理	53
5.2.2 塗料の試作	53
5.2.3 塗装試片の作製と促進耐候性試験	54
5.2.4 塗膜の引張試験	54
5.2.5 塗膜の動的粘弾性測定	55
5.3 結果と考察	55
5.4 まとめ	60
第6章 結論	61

引用文献	63
------------	----

第1章 序論

1.1 緒言

日本は、国土面積の約3分の2を森林が占める世界有数の森林国である¹⁾。森林のうち約4割が天然林等、約6割が人工林となっており、戦後に植林された人工林を中心に利用可能な時期を迎えている¹⁾。手入れが行き届かず、国土の保全や水源のかん養、地球温暖化防止などの多面的な機能が十分に発揮されていない森林も見受けられ、国内の豊富な森林資源を循環利用することが重要な課題となっている¹⁾。これまで木材需要には住宅分野が大きく寄与していたが、今後は少子高齢化の影響や住宅ストックの充実、中古住宅の流通促進施策の進展などにより、新設住宅着工数は減少する可能性がある¹⁾。住宅分野に代わる市場として、非住宅建築や中高層建築、土木分野などの新規需要の拡大が求められている¹⁾。国では平成22年に「公共建築物等における木材利用の促進に関する法律」を施行し、また、シンボル性の高い取り組みとしては2020年東京オリンピック・パラリンピックの主要施設である新国立競技場における木材利用があり、非住宅分野での木材利用の拡大が進んでいる¹⁾。

木材は内装材用途としてだけでなく、外壁現わし構造材、板壁、窓枠、ルーバー等の外装材やデッキ、フェンスとして屋外での利用を促進している。屋外における木材の劣化は、太陽光や雨水などの作用による気象劣化と、腐朽やシロアリ食害などによる生物劣化に大別される²⁻⁴⁾。生物劣化を抑制し、木材の寸法安定性を向上させる処理方法はいくつか開発されており、その一つに熱処理がある⁴⁾。熱処理木材は窒素雰囲気下や水蒸気雰囲気下などで150℃～240℃の加熱処理で製造される^{5, 6)}。処理温度が高くなるにつれ、木材が暗色になり、耐朽性や寸法安定性が向上する^{5, 6)}。熱処理木材は耐朽性や寸法安定性が向上し、薬品類を用いず熱処理のみで製造することから、環境に配慮した材料としてヨーロッパ諸国を中心に需要が伸びている⁷⁾。国内でも類似した熱処理方法が開発され、製品化されている

5)。
。

熱処理木材を屋外で使用した場合、変色や表面に微細な割れが生じるなどの問題点があることが分かってきた⁸⁻¹⁰⁾。木材を気象劣化から守る比較的安価な方法として塗装があり、熱処理木材についても美観を維持したまま長く使用するためには、塗装による保護が有効であると考えられる。熱処理木材の塗装についての検討はいくつか行われており、着色塗装の効果^{9,10)}や塗料中に添加する紫外線吸収剤¹¹⁾についての報告はあるが、国内で一般的に使用されている木材保護塗料についてはほとんど検討されていない。木材保護塗料は、木目を活かした仕上げが可能な半透明系の屋外用塗料である。塗膜が透明であるほど光劣化を受けやすくなるため、木目が見える仕上げになるほど耐候性が低い傾向がある^{3,12)}。諸外国では着色塗装かあるいは無塗装が一般的であるが、日本では木目が見える仕上げとなる透明系または半透明系の塗装が好まれる³⁾。

塗料は、固化したのち塗膜として残る成分（塗膜形成要素）と粘度を下げ塗りやすくする役割はあるが塗膜中には残存しない成分（塗膜形成助要素）から成り立っている^{13,14)}。塗膜形成要素には、塗膜の主成分となる塗膜形成主要素と、塗料や塗膜の機能を向上させる塗膜形成副要素、顔料や染料などの着色材が含まれる^{13,14)}。塗膜形成主要素は主に樹脂が用いられ、塗膜の性能に大きく寄与する。塗膜形成副要素には、可塑剤、乾燥剤、顔料分散剤、消泡剤、はじき防止剤、レベリング剤、紫外線吸収剤など多くのものがあり、目的に合わせて微量配合される^{13,14)}。塗膜形成助要素は一般的には溶剤が用いられるが、近年、揮発性有機化合物の低減を目的として開発された水性塗料には水が用いられている¹³⁾。新しい塗料を開発する際には、木材の特性と使用目的に合わせてこれらの成分の配合を設計する。そのため、熱処理木材に適した屋外用塗料を開発するためには、無処理木材との劣化機構が異なる点を把握することが重要となる。

本研究では、熱処理木材に適した塗料および塗装仕様の開発に寄与する知見を得ること

を目的に、熱処理木材と無処理木材の暴露による劣化機構の違いを検討するとともに、日本で一般的な木材保護塗料による熱処理木材の塗装効果および熱処理木材の表面割れ抑制効果のある塗膜の機械的性質について検討した。

1.2 既往の研究

1.2.1 木材の熱処理に関する研究

木材の表面を焼くことにより耐久性を付与できることは古くから知られている。フィンランドでは農耕外柵の土に埋める部分に伝統的に行われており¹⁵⁾、日本では琴、桐箏箏などの表面処理をはじめ、外壁板に伝統的に使われている焼杉などがある。

木材の熱処理に関する研究は、1930年代にドイツで、1940年代には米国で行われ¹⁵⁾、その後、ヨーロッパを中心に研究、開発が進められてきた。木材の熱処理は150～240℃の高温で加熱処理をする技術であり、様々な方法が開発されている。フィンランドの常圧・水蒸気雰囲気下で処理するサーモウッド処理やオランダの加圧蒸煮処理後に乾燥するPLATO処理、フランスの常圧・不活性ガス下で処理するレティフィケーション処理、ドイツの植物油中で処理するオイル処理などがある^{5,6)}。日本でも類似した熱処理方法が開発され、スギやヒノキの熱処理木材が製品化されている⁵⁾。

処理温度が高くなるにつれ、木材が暗色になり、耐朽性や寸法安定性、断熱性が向上するが、強度は低下する^{6)~8)}。熱処理による成分変化は次のように推定されている。ヘミセルロースが分解され、それに伴いセルロース結晶化度が上昇し、リグニンの糖に対する相対的な割合も上昇する。熱処理温度が200℃まで上がると、準結晶領域にあるセルロースが結晶化する反応やリグニン同士あるいはリグニンと他の木材成分との縮合反応が起こる。これらの反応によって、木材の平衡含水率が低下し、耐朽性や寸法安定性の向上に寄与すると考えられている^{2, 3)}。また、熱処理によって疎水的になることにより木材表面の撥水性が高くなること

も分かっている²⁻⁶⁾。

1.2.2 熱処理木材の耐候性に関する研究

熱処理木材を屋外で使用した場合、変色や表面に微細な割れが生じるなどの問題点があることが分かってきた⁸⁻¹⁰⁾。木材を気象劣化から守る比較的安価な方法として塗装があり、熱処理木材についても美観を維持したまま長く使用するためには、塗装による保護が有効であると考えられる。

1.2.3 熱処理木材の塗装に関する研究

熱処理木材の塗装についての検討はいくつか行われており、着色塗装の効果^{9,10)} や塗料中に添加する紫外線吸収剤¹¹⁾ についての報告はあるが、国内で一般的に使用されている木材保護塗料についてはほとんど検討されていない。木材保護塗料は、木目を活かした仕上げが可能な半透明系の屋外用塗料である。塗膜が透明であるほど光劣化を受けやすくなるため、木目が見える仕上げになるほど耐候性が低い傾向がある^{3,12)}。諸外国では着色塗装かあるいは無塗装が一般的であるが、日本では木目が見える仕上げとなる透明系または半透明系の塗装が好まれる³⁾。

1.3 本論文の構成

本論文の章立ての構成を以下に示す。

第2章では、塗料開発の際に塗膜の機械的性質を設計する上で重要となる、暴露により発生する熱処理木材の表面割れの形態的な解析を試みた。促進耐候性試験を行い、熱処理木材に発生する表面割れの長さや幅、面積を画像処理により解析し、無処理木材に発生する表面割れとの違いを比較した。

第3章では、塗料開発の際に紫外線吸収剤や顔料の配合を設計する上で重要とな

る、紫外光から可視光までの熱処理木材の変色に及ぼす波長依存性を評価した。多波長照射分光器を用いて紫外線から可視光を分光・照射し、熱処理木材の光変色と波長依存性の関係を検討した。

第4章では、国内で一般的に使用されている木材保護塗料で塗装した熱処理木材の耐候性能を評価した。屋外暴露試験を行い、塗装した熱処理木材と無処理木材との耐候性能を比較した。また、塗装面の表面分析を行い、熱処理木材と無処理木材との塗装面の違いが耐候性能に及ぼす影響を検討した。

第5章では、第2章の結果をふまえて、熱処理木材の表面割れ抑制に効果のある塗膜の機械的性質について調べた。機械的性質の異なる塗料を試作し、塗装した熱処理木材の促進耐候性試験を行い、熱処理木材に発生する表面割れの抑制効果と塗膜の機械的性質との関係を検討した。

第 2 章 促進耐候性試験における熱処理木材の表面割れの形態的解析

2.1 はじめに

暴露により発生した木材の表面割れを形態的に解析することは、塗料の主成分である樹脂の柔軟性や強度などの機械的性質を設計する上で重要となる。本章では、促進耐候性試験を行い、熱処理木材に発生した表面割れを画像処理による形態的な解析を試みた。

2.2 実験方法

2.2.1 試料

スギ (*Cryptomeria japonica*) の板目の辺材 (150 mm (L) × 70 mm (T) × 20 mm (R)) を供試材とした。熱処理は常圧、窒素雰囲気下で行った。真空定温乾燥器 (DRV320DC、アドバンテック東洋株) に試験体を 4 体入れ、乾燥器内を真空にした後、窒素ガスを大気圧まで充填した。室温から処理温度 220°C まで 16 時間かけて昇温した後、6 時間熱処理を行った。熱処理後は室温まで自然冷却した。表面は自動かん盤 (株マキタ, 2031S) を用いてプレーナー仕上げにした。比較用に無処理のスギも試験に用いた。全乾密度は熱処理木材、無処理木材のいずれも 0.31 g/cm³ であった。

2.2.2 促進耐候性試験

スーパーキセノンウェザメーター (SX75、スガ試験機株) を用いて、促進耐候性試験を行った。インナーフィルターは石英ガラス、アウターフィルターは 275nm 以下をカットするものを選択した。放射照度は波長 300~400 nm で 60 W/m² となるよう制御し、ブラックスタンダード温度 65±2°C、120 分照射中 18 分間水噴霧の条件で 300 時間と 500 時間行った。100 時間あたりの放射露光量

は平均 22 MJ/m² であった。各試験時間につき 3 試験体ずつ促進耐候性試験に供した。

2.2.3 画像処理による表面割れの解析

促進耐候性試験 500 時間後の試片を ICC プロファイル作成ソフトウェア ilprofiler (エックスライト社) でカラー補正したカラースキャナー (GT-X980、セイコーエプソン(株)) を用いて、24 ビットカラー、解像度 600dpi、TIFF 形式で取り込んだ画像を画像処理解析ソフトウェア ImageJ に読み込み、以下の手順で解析した。

- ① カラー画像を 256 階調のグレースケール画像に変換する。
- ② Smooth と Sharpen を交互に 4 回繰り返した後に Smooth を行い、ノイズを取り除いた。
- ③ Phansalkar の方法で Radius を 15 に設定し、二値化する。
- ④ 対象とするサイズを 20-Infinity に設定し、Analyze Particle を行い、割れ部分を抽出し、割れの幅、長さ、面積の計算を行う。

画像の二値化では、木目や節、毛羽立ちによる影と表面割れを区別出来なかったため、面積の計算の際に、木目と節、毛羽立ちは除外して計算した。画像処理による表面割れの解析例を図 2.1 に示す。また、木目のある画像の表面割れの解析例を図 2.2 に示す。

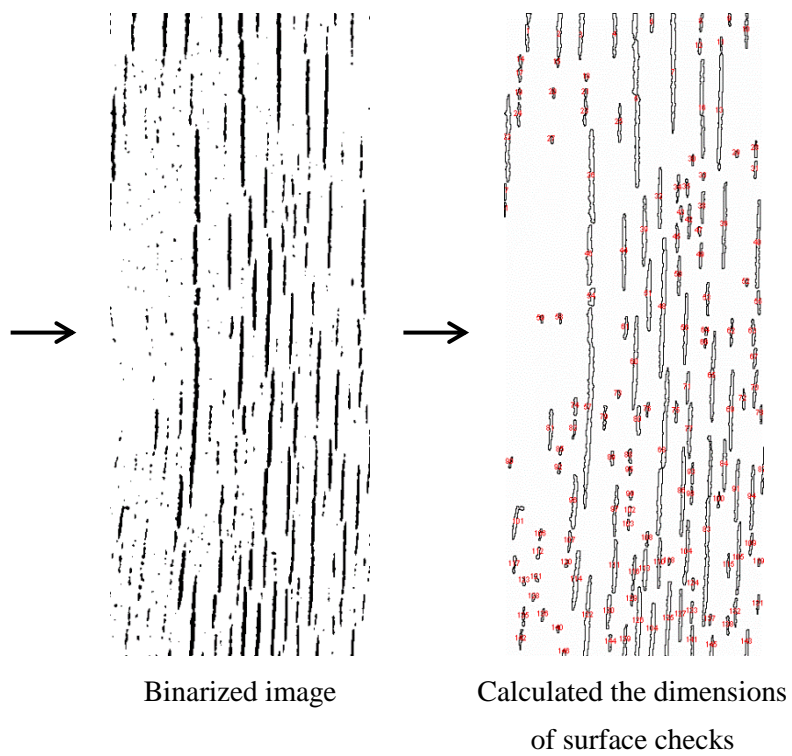
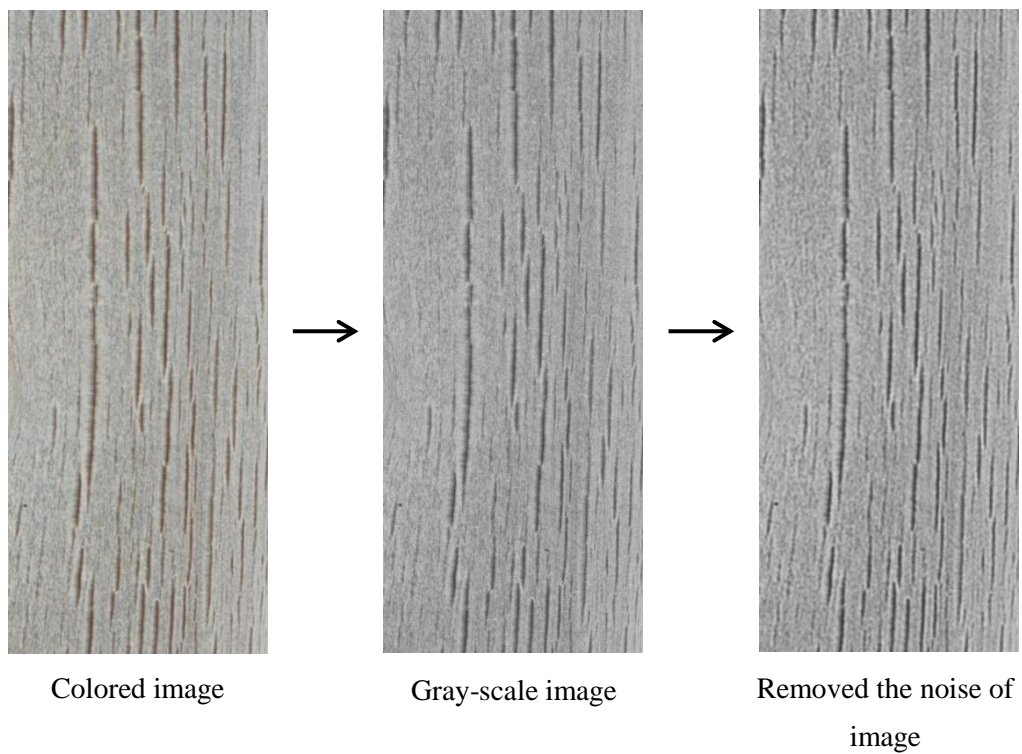


Figure 2.1 Example of surface checks analysis by using image processing

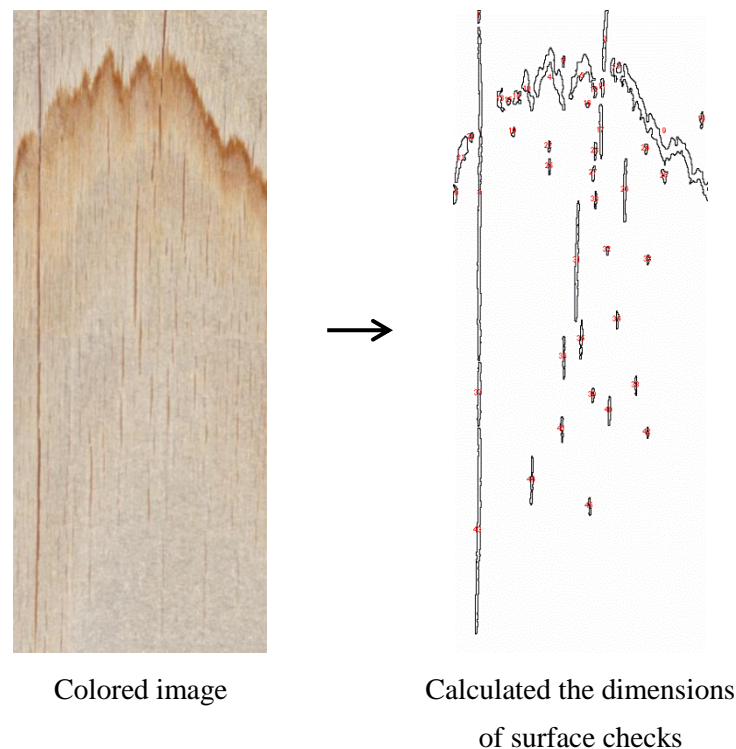


Figure 2.2 Example of surface checks analysis of image with grain
Note that grain have been retained as spurious checks.

2.2.4 電子顕微鏡による表面観察

促進耐候性試験前、300 時間後の試片の早材部表面を走査型電子顕微鏡（株式会社日立ハイテクノロジーズ、TM3030Plus）を用いて観察した。10 mm (L) × 20 mm (T) × 20 mm (R)の大きさに切り出した小試片に、Au-Pd（金-パラジウム）で蒸着し、加速電圧 5 kV の条件で二次電子像を観察した。

2.2.5 電子顕微鏡による断面観察

促進耐候性試験前、300 時間後、500 時間後の試片の断面（木口面）を走査型電子顕微鏡（株式会社日立ハイテクノロジーズ、TM3030Plus）を用いて観察した。10 mm (L) × 20 mm (T) × 20 mm (R)の大きさに切り出した小試片を、水に 1 時間浸

せきした後にミクロトームで木口面を切り出した。Au-Pd（金-パラジウム）で蒸着し、加速電圧 15 kV の条件で反射電子像を観察した。

2.2.5 膨潤率の測定

促進耐候性試験前、300 時間後、500 時間後の試片の接線方向の膨潤率を測定した。10 mm (L) × 20 mm (T) × 20 mm (R)の大きさに切り出した小試片を用いた。試片を 60℃で一昼夜乾燥したあと、103±2℃ で質量一定（全乾状態）になるまで乾燥し、マイクロメーターを用いて寸法を測定した。その後、23±2℃、80±5% RH の条件の恒温恒湿槽の中に 33 日間おき、寸法を測定した。以下の (2.1) 式より膨潤率 (%) を算出した。各試験条件につき 5 個の試験体を用いた。

$$\text{膨潤率 (\%)} = (L_1 - L_0) / L_0 \times 100 \quad (2.1)$$

L_0 : 全乾の時の寸法 (mm)

L_1 : 23℃、80%RH の時の寸法 (mm)

2.2.6 平衡含水率の測定

促進耐候性試験前、300 時間後、500 時間後の試片の平衡含水率を測定した。10 mm (L) × 20 mm (T) × 20 mm (R)の大きさに切り出した小試片を用いた。試片を 23±2℃、50±5%RH の条件の恒温恒湿槽の中に 44 日間おき、質量を測定した。その後、試片を 60℃で一昼夜乾燥したあと、103±2℃ で質量一定（全乾状態）になるまで乾燥し、質量を測定した。(2.2) 式より平衡含水率を算出した。各試験条件につき 5 個の試験体を用いた。

$$\text{平衡含水率 (\%)} = (m_1 - m_0) / m_0 \times 100 \quad (2.2)$$

m_0 : 全乾の時の質量 (mm)

m_1 : 23°C、50%RH の時の質量 (mm)

2.3 結果と考察

2.3.1 画像処理による表面割れの解析

表 2.1 に画像処理による表面割れの形態の解析結果を、図 2.3 に試片表面のカラー画像を示す。促進耐候試験 500 時間後では、割れ長さと割れ面積は熱処理木材に比べ無処理木材の方が大きく、割れ幅は熱処理木材と無処理木材とで同じであった。割れの面積割合は熱処理木材の方が無処理木材に比べて大きかった。これらのことから、熱処理木材では表面全体に短く小さな割れが発生する傾向があり、一方、無処理木材では熱処理木材に比べ局部的に長さのある大きな割れが発生する傾向があることが分かった。

Table2.1 Results of surface checks analysis
after Xenon-Arc accelerated weathering test 500hrs

	Length(mm)			Width(mm)			Area(mm ²)			Ratios of Area(%) ^{a)}	
	Average	Max	SD ^{b)}	Average	Max	SD	Average	Max	SD	Average	SD
Untreated wood	2.2	98.7	5.7	0.2	1.0	0.1	0.3	19.3	1.1	0.5	0.1
Heat-treated wood	1.7	20.0	1.8	0.2	1.0	0.1	0.2	4.0	0.3	7.2	3.3

a) Ratios of area was calculated with irradiated portion of specimen (7167mm²) as unit area.

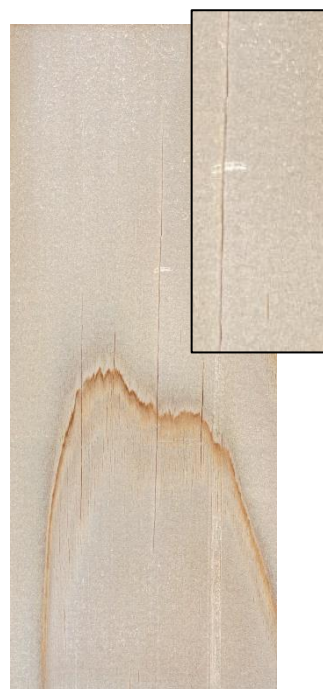
b) Standard deviation



Before weathering test



After weathering test 300hrs



After weathering test 500hrs

Untreated wood



Before weathering test



After weathering test 300hrs



After weathering test 500hrs

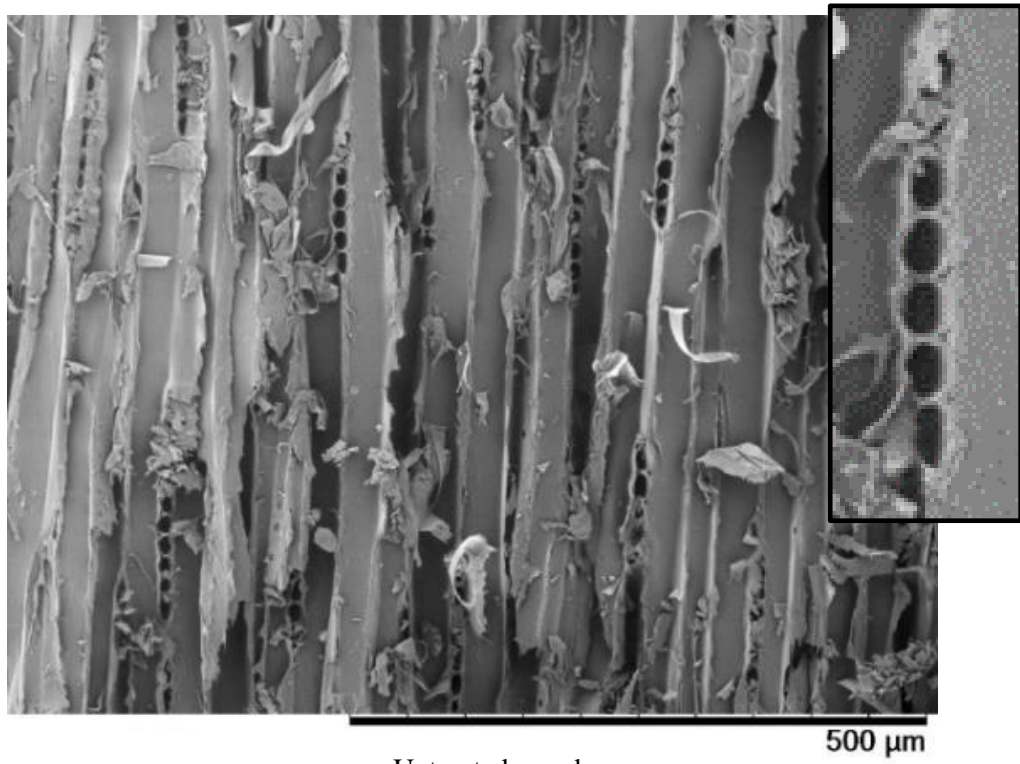
Heat-treated wood

Figure 2.3 Color images before and after xenon-arc accelerated weathering

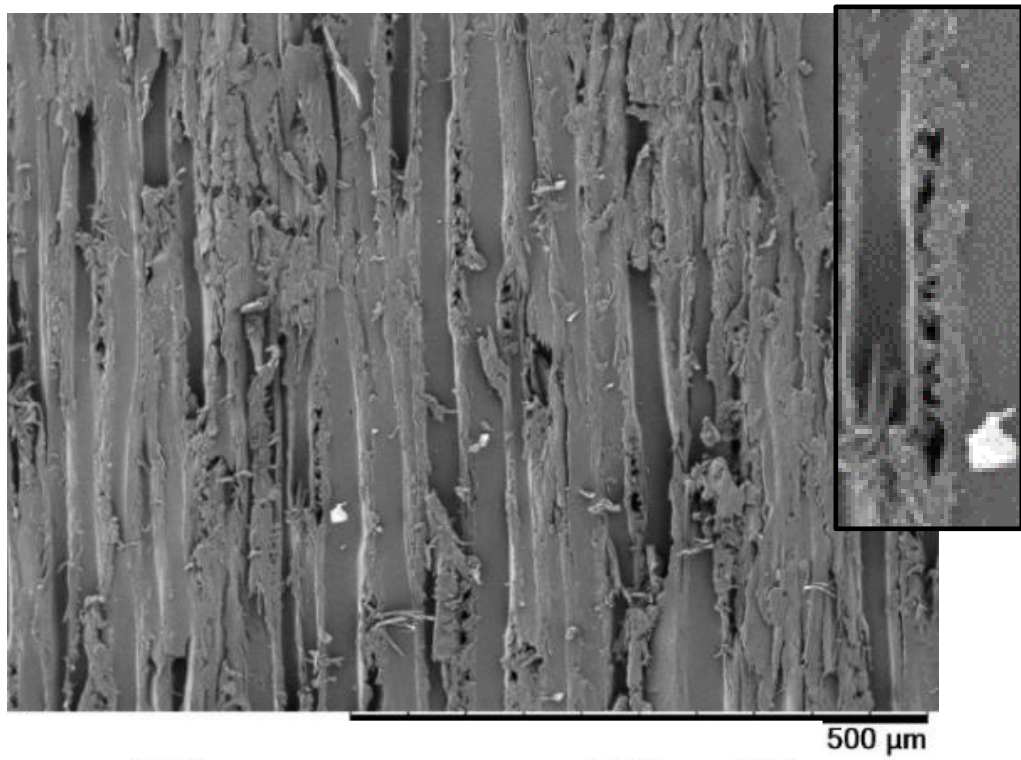
2.3.2 表面観察

図 2.4 に促進耐候試験前の早材部表面の走査型電子顕微鏡写真 (SEM 像) を、図 2.5 に促進耐候試験 300 時間後の試片表面の SEM 像を示す。促進耐候試験前の熱処理木材では放射組織がつぶれた状態になっているのが見てとれた。促進耐候性試験 300 時間後では熱処理木材、無処理木材のいずれも促進耐候性試験前には見られなかった壁孔が見てとれた。これは、促進耐候性試験により、放射組織が破壊され、壁孔が露出したためだと推測される。また、無処理木材では壁孔とともに放射組織を確認できたが、熱処理木材では放射組織を見てとれなかった。さらに、熱処理木材では壁孔からの亀裂が確認された (図 2.5 矢印)。

暴露の初期段階の板目材の表面割れは晩材部の放射組織が起点となり、その後繊維方向に伝播し、やがて早材部に達することが報告されている¹⁾。放射組織は雨水が出入りしやすく、さらに晩材部では大きな収縮応力が発生するため、表面割れの起点になりやすい¹⁾。また、柾目面や板目面の暴露初期における劣化として、有縁壁孔の亀裂がある^{2,3)}。本実験では板目材を試験に用いたが、図 2.3 より無処理木材では促進耐候性試験 500 時間後に、矢田らの報告のとおり¹⁾、晩材部を中心に表面割れが伝播していることが目視により確認された。一方、熱処理木材では晩材部よりも早材部全体で表面割れの発生が見てとれた。これは、熱処理木材では熱処理によって早材部の放射組織がつぶれた状態となっており (図 2.4)、この早材部の放射組織が破壊され、さらに壁孔の亀裂となり (図 2.5)、目視で確認できる表面割れに進展したためだと推測される。このため、熱処理木材は無処理木材に比べて表面全体 (早材部全体) に表面割れが発生しやすい傾向があったと考えられる。

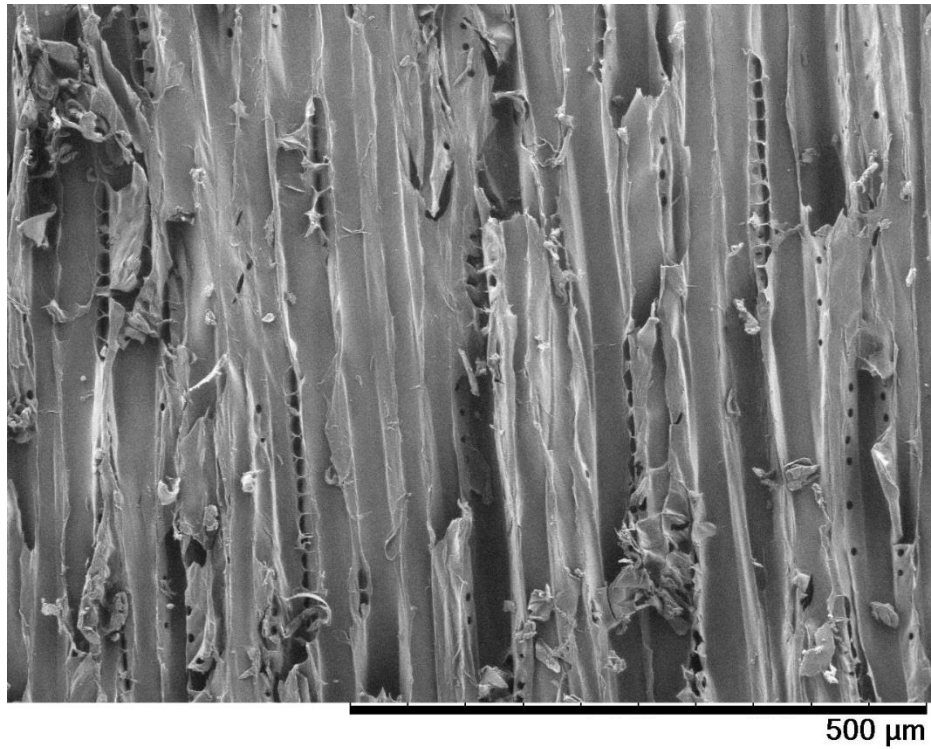


Untreated wood

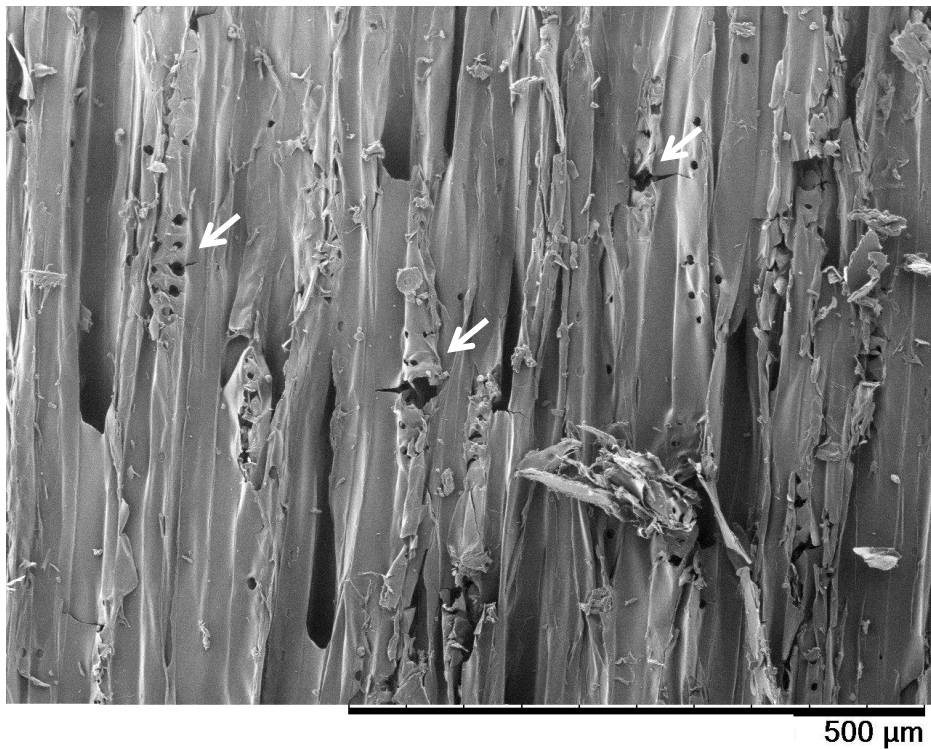


Heat-treated wood

Figure 2.4 SEM images of the sample surface
before xenon-arc accelerated weathering test ($\times 200$)



Untreated wood



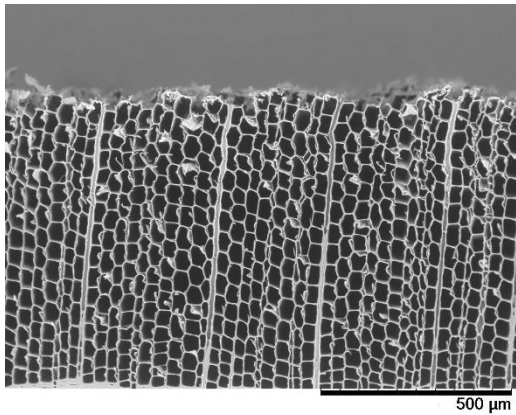
Heat-treated wood

Figure 2.5 SEM images of the sample surface
after xenon-arc accelerated weathering test 300hrs ($\times 200$)

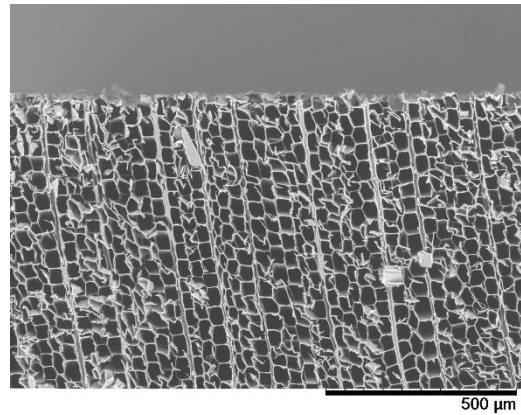
2.3.3 断面観察

図 2.6 に促進耐候性試験前後の試片の断面（木口面）の SEM 像を示す。促進耐候性試験 300 時間後では、無処理木材に比べて熱処理木材の方が、光分解により脆弱した細胞壁の層が厚いことが見てとれた。促進耐候性試験 500 時間後には、無処理木材では 300 時間後に比べて脆弱層が厚くなっていた。一方、熱処理木材では促進耐候試験 500 時間後には 300 時間後に比べて脆弱層が減少し、さらに小亀裂の発生が多く見てとれた。

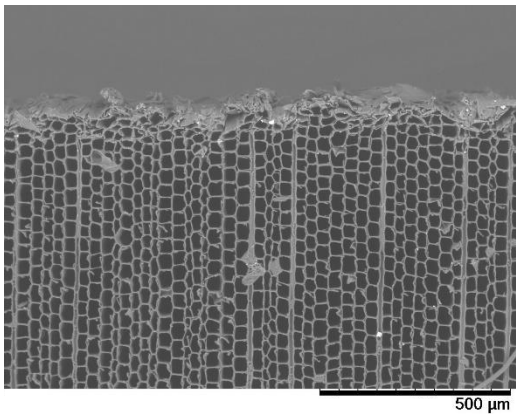
リグニンの光分解による細胞壁および細胞間層の強度低下に伴って、仮道管が脱落し、微細割れや落ち込みを生じやすく、また、雨水などにより浸食作用を受けやすくなる¹⁻³⁾。促進耐候試験 500 時間で熱処理木材の脆弱層が減少し、小亀裂が生じていたのは、促進耐候性試験の水噴霧により、強度低下した仮道管が脱落し、浸食作用を受けたためだと考えられる。このことから、熱処理木材は無処理木材に比べて促進耐候性試験により浸食作用を受けやすいことが示唆された。



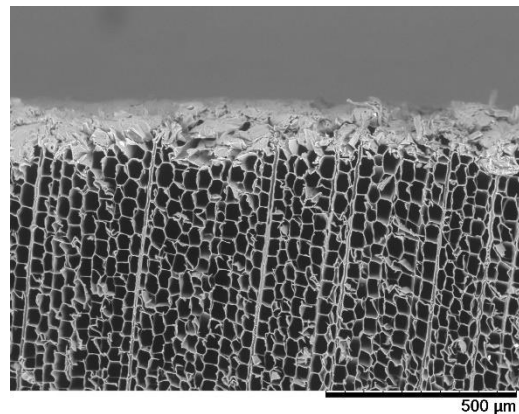
Untreated wood before weathering



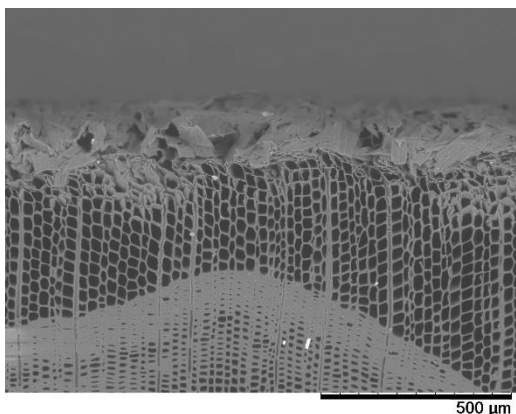
Heat-treated wood before weathering



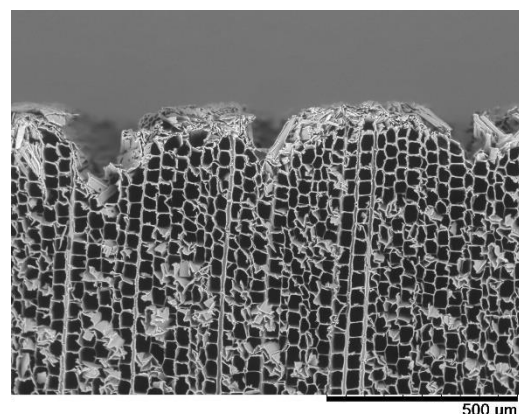
Untreated wood after weathering test 300hrs



Heat-treated wood after weathering test



Untreated wood after weathering test 500hrs



Heat-treated wood after weathering test 500hrs

Figure2.6 SEM images of end grain surfaces ($\times 120$)

2.3.4 膨潤率、平衡含水率の変化

図 2.7 に促進耐候性試験前後の接線方向の膨潤率を、図 2.8 に促進耐候性試験前後の試片の平衡含水率の結果を示す。熱処理木材は無処理木材に比べて膨潤率、平衡含水率のいずれも低かった。膨潤率は促進耐候性試験前後で無処理木材、熱処理木材のいずれもほとんど変化が認められなかった。一方、平衡含水率は無処理木材、熱処理木材のいずれも促進耐候性試験後は促進耐候性試験前に比べて高くなった。特に促進耐候性試験 300 時間後の平衡含水率が高くなった。

無処理木材、熱処理木材のいずれも促進耐候性試験のより、リグニンが分解・溶出し、表面はセルロースが露出し、続いてセルロースの非晶部が分解される^{4,5)}。また、暴露初期ではリグニンの分解速度が速いため、セルロースの相対的な量が増加し、その後低下する⁵⁾。熱処理木材、無処理木材のいずれも促進耐候性試験後は平衡含水率が高かったため、表層の脆弱層（図 2.6）は、セルロースが豊富な層であると推測され、表層は寸法安定性が低下している可能性がある。また、促進耐候性試験 300 時間後で最も平衡含水率が高く、その後 500 時間後で低下したのは、リグニンの分解速度が速く、300 時間後ではセルロースの相対的な量が増加したためだと考えられる。膨潤率は熱処理木材、無処理木材のいずれも促進耐候性試験前後で変化しなかったのは、試片の中央部の寸法を測定したためだと推測される。

無処理木材は熱処理木材に比べて膨潤率が高いことから、促進耐候性試験により熱処理木材に比べて試料全体が膨潤・収縮しやすく、局部的に長さのある大きな割れが発生する傾向があったと考えられる。一方、熱処理木材は促進耐候性試験により強度低下した表面の脆弱層で膨潤・収縮が起こりやすく、表面全体に短く小さな割れが発生する傾向があったと推測される。

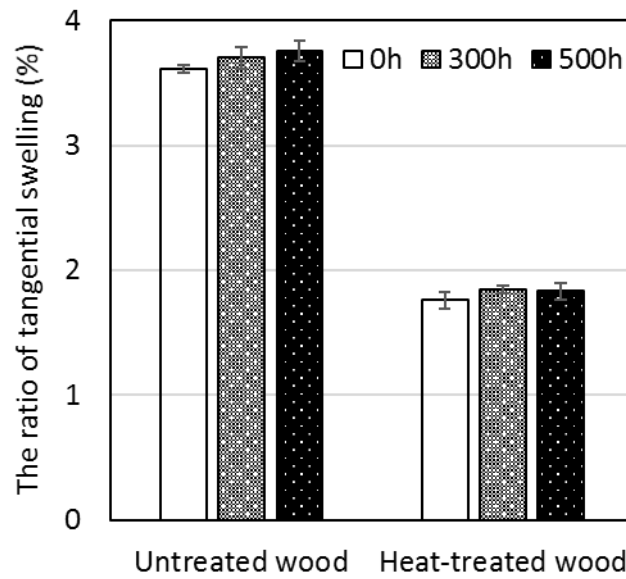


Figure 2.7 Swelling ratio of the samples (oven-dried→23 °C, 80%RH) exposed for 0 hour (before weathering test), 300 hours and 500 hours

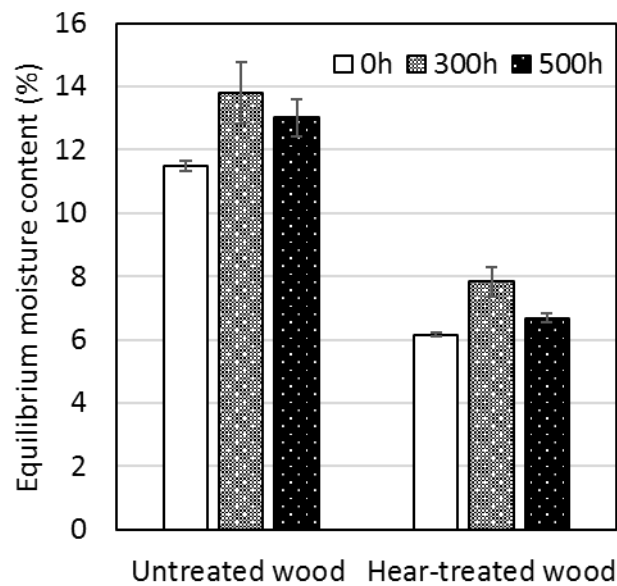


Figure 2.8 Equilibrium moisture content (23°C, 50%RH) of the samples exposed for 0 hour (before weathering test), 300 hours and 500 hours

2.4 まとめ

スギの板目の熱処理木材（常圧、窒素雰囲気下、処理温度 220℃、処理時間 6 時間）の促進耐候性試験を行い、発生した表面割れを画像処理による形態的な解析を試みた。熱処理木材では表面全体に長さが短い小さな割れが発生する傾向があり、一方、無処理木材では熱処理木材に比べ局部的に長さのある大きな割れが発生する傾向があることが分かった。

電子顕微鏡による表面観察により、促進耐候性試験前の熱処理木材の早材部表面は放射組織がつぶれた状態になっていることが見てとれた。この熱処理によりつぶれた状態になった放射組織が起点となり、熱処理木材は促進耐候性試験により表面全体（早材部全体）に表面割れが発生しやすい傾向があったと推測される。

第3章 熱処理木材の光変色における波長依存性

3.1 はじめに

塗料の主成分である樹脂の耐候性を向上させるために、紫外線吸収剤や顔料などが添加される。塗料中の紫外線吸収剤や顔料の配合を設計する上では、紫外線から可視光までの木材の光劣化における波長依存性を把握することが重要となる。本章では、紫外線から可視光を分光・照射することにより、熱処理木材の光変色と波長依存性の関係を検討した。また、分光反射率の測定により、光吸収と光変色との関係についても検討した。

3.2 実験方法

3.2.1 試料

スギ (*Cryptomeria japonica*) の板目の辺材 (150 mm (L) × 70 mm (T) × 20 mm (R)) を供試材とした。第2章 2.1.1 と同様の方法で、常圧、窒素雰囲気下、処理温度 220°C、処理時間 6 時間の条件で熱処理を行った。表面は自動かんな盤 (株式会社マキタ, 2031S) を用いてプレーナー仕上げとした。試片はアルミホイルで包み、光が当たらないように保管した。比較用に無処理のスギも試験に用いた。全乾密度は熱処理木材、無処理木材のいずれも 0.31 g/cm³ であった。

3.2.2 分光照射試験

波長照射分光器 (MM-3 型、分光計器株式会社) を用いて、35 mm (L) × 10 mm (T) × 12 mm (R) の大きさに切り出した小試片で分光照射試験を行った。回折格子により 310 nm の紫外線から 490 nm の可視光をバンド幅約 20 nm、波長間隔約 25~30 nm の条件で分光し、試片表面を照射した。各波長帯の放射露光量が 1 MJ/m² となるように照射した。照射時間は 1 MJ/m² あたり 51~73 分間であった。各波長

帯の照度と照射時間を表 3.1 に示す。分光照射試験前後に試片の測色を行った。
各試験条件につき 3 個の試片を用いた。

Table3.1 Spectral power distribution and irradiation time of the light source

Average wavelength (nm)	310	341	372	403	427	458	490
Irradiance (W/m ²)	294	323	324	253	263	265	230
Irradiation time (min)	57	52	52	66	63	63	73

Note: Each monochromatic radiation was emitted with a band pass of 20 nm.

3.2.3 測色

色差計（日本電色工業㈱、NF333）を用いて、試片表面の CIELAB 色空間における L^* （明度）、 a^* （正：赤方向、負：緑方向）、 b^* （正：黄方向、負：青方向）を測定し、以下の式(3.1)～(3.4)により ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 、 ΔE^*_{ab} （色差）を計算した。測色条件は、光源を D65、視野角を 10 度、測色部の直径を 8 mm とし、1 試片につき定位 3 箇所を測定し、測定値を平均した。表 3.2 に分光照射試験前の測色値を示す。

$$\Delta L^* = L^*_n - L^*_0 \quad (3.1)$$

$$\Delta a^* = a^*_n - a^*_0 \quad (3.2)$$

$$\Delta b^* = b^*_n - b^*_0 \quad (3.3)$$

$$\Delta E^*_{ab} = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{1/2} \quad (3.4)$$

ここで、

L^*_0 、 a^*_0 、 b^*_0 : 分光照射試験前の L^* 、 a^* 、 b^* 値

L^*_1 、 a^*_1 、 b^*_1 : 分光照射試験後の L^* 、 a^* 、 b^* 値

Table 3.2 Color parameters of the sample before exposure to light

	L^*		a^*		b^*	
	Average	SD	Average	SD	Average	SD
Untreated wood	79.5	2.2	3.8	0.6	19.0	2.0
Heat-treated wood	34.1	2.4	8.5	0.8	16.5	3.2

SD: Standard deviation

3.2.4 赤外分光分析

フーリエ変換赤外分光分析装置（日本分光㈱、FT/IR-6100）と一回反射 ATR 装置（同、PRO450-S）を組み合わせ、ダイヤモンドプリズムを用いて試片の早材部表面の赤外吸収スペクトルを測定した。測定条件は、波数範囲 4000 cm^{-1} ～ 400 cm^{-1} 、積算回数 60 回、分解能 8 cm^{-1} とした。なお、試片はシリカゲル入りのデシケーター内で乾燥してから試験に供した。

3.2.5 全光線反射率測定

紫外可視近赤外分光光度計（SolidSpec 3700DUV、㈱島津製作所）により、積分球を用い、試片の早材部表面の全光線反射率測定を行った。バンド幅 8 nm、サンプリング間隔 5 nm の条件で 300～500 nm の波長範囲を測定した。照射ビームサイズは約 $6\times 15\text{ mm}$ であり、基準試料として値付けされた白色標準板を用いた。5 箇所測定し、再現性を確認した。

3.3 結果と考察

図 3.1 に分光照射による試片の変化量 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* および色差 ΔE^*_{ab} を、図 3.2 に試片表面の全光線反射率を示す。無処理木材は 278 nm～341 nm 付近の短波長側の紫外域で色差が大きく、 L^* が減少し、 a^* 、 b^* が増加して暗・濃色化した。紫外線による暗・濃色化はリグニンの光酸化分解物に起因することが知られている⁸⁾。一方、熱処理木材では 372 nm～427 nm 付近の長波長側の紫外域～

紫色の可視域で色差が大きく、 L^* 、 a^* 、 b^* のいずれも減少した。熱処理木材の変色は紫外線によるリグニンの光分解反応とは異なるメカニズムで生じていると推測される。熱処理木材と無処理木材では光変色が生じる波長の傾向が異なることが分かった。

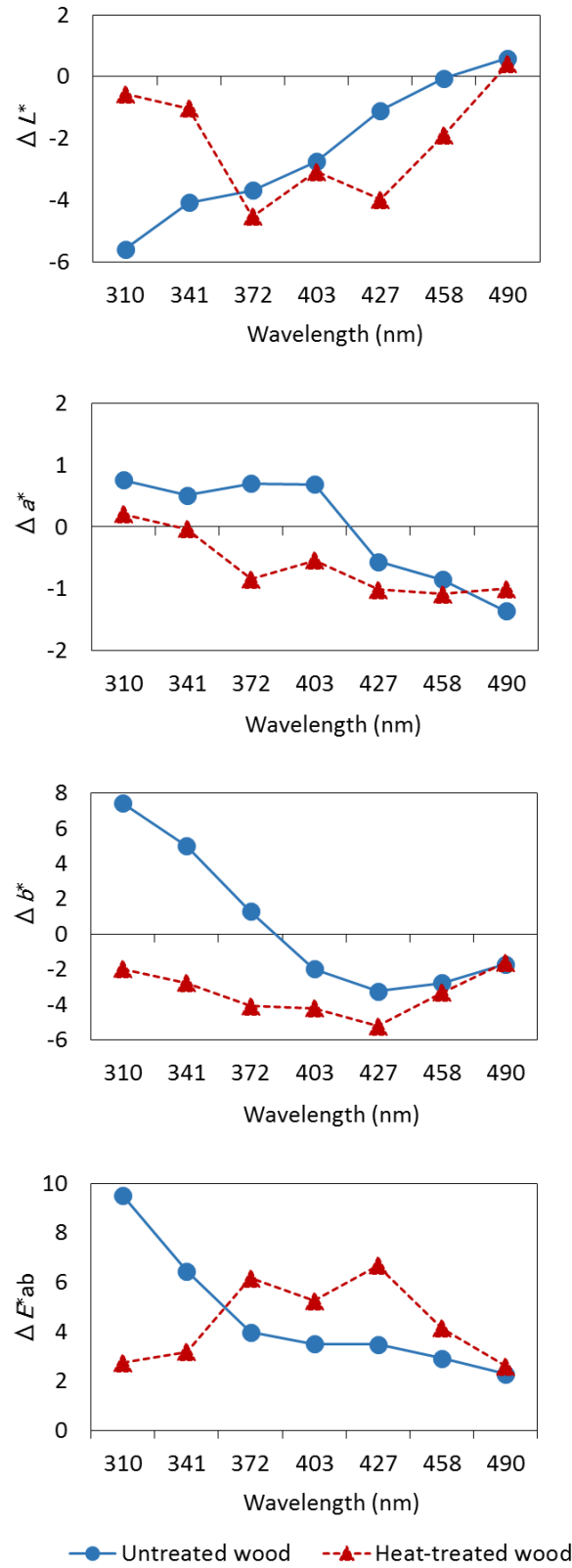


Figure 3.1 Changes in color of exposed sample surface after 1 MJ/m² irradiation at different wavelength
 ΔL^* : Lightness difference $\Delta a^*, \Delta b^*$: a^*, b^* difference ΔE^*_{ab} : Color difference

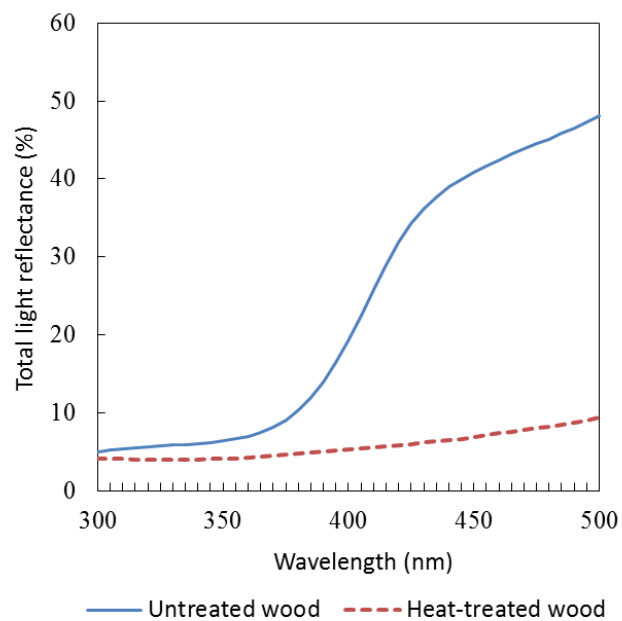


Figure 3.2 Total light reflectance of sample surface

3.4 まとめ

熱処理木材と無処理木材では光変色が生じる波長の傾向が異なることが分
かり、塗料設計の際には熱処理木材に合わせた紫外線吸収剤や顔料の配合を行
なう必要があると考えられる。

第4章 木材保護塗料を用いて塗装した熱処理木材の耐候性能

4.1 はじめに

熱処理木材の美観を維持したまま屋外で長く使用するためには、塗装による保護が有効であると考えられる。ただし、熱処理によって生じた表面状態の変化が塗料の浸透性や耐候性能に影響する可能性がある。本章では、国内で一般的に使用されている木材保護塗料で塗装した熱処理木材の表面分析を行い、通常の木材の塗装面と比較するとともに、さらに屋外暴露試験を行い塗装面と耐候性能との関係を考察する。木材保護塗料は、木目を活かした仕上げが可能な半透明着色の屋外用塗料であり、防カビ性能、防腐性能、防虫性能、撥水性能などが付与されている¹⁾。

4.2 塗装した熱処理木材の表面分析

4.2.1 実験方法

4.2.1.1 試料

塗装基材には、市販のスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) の熱処理木材 (常圧、水蒸気雰囲気下、処理温度 220℃、全乾密度 0.37 g/cm³) の追いまさ目および板目の試片 (150 mm (L) × 70 mm (T) × 15 mm (R)) と比較用に無処理のスギ (全乾密度 0.38 g/cm³) を用いた。表面 (塗装面) は自動かんな盤 (株マキタ、2031S) を用いてプレーナー仕上げにした。

木材保護塗料は日本建築学会建築工事標準仕様書 (JASS 18M-307)¹⁾ に適合する市販品から選定し、油性塗料 (アルキド樹脂系) と水性塗料 (アクリル樹脂系) の2種類、塗膜の形成タイプは含浸形と半造膜形の2種類、色は油性塗料ではダークブラウン色、水性塗料ではライトブラウン色とした。刷毛塗りで試片を作製し、メーカー推奨の塗り回数とし、油性塗料は下塗り用1回、上塗り用2回、水性塗料は下塗り・上塗り兼用を2回塗りし

た。

表 4.1 に試片の塗装条件と塗布量を示す。各条件につき 3 片ずつ作製し、そのうちの 1 片を本実験の表面分析に供した。

Table 4.1 Description of coating systems and coating weights

Presence of heat treatment	Type of dissolvent of coating	Type of coating layer	Application (times)	Mean coating weight (wet, g/m ²)
Untreated	—	—	—	—
Heat-treated	—	—	—	—
Untreated	Solvent borne	Penetrating	3	91
Heat-treated	Solvent borne	Penetrating	3	94
Untreated	Solvent borne	Semi-film forming	3	103
Heat-treated	Solvent borne	Semi-film forming	3	123
Untreated	Water borne	Penetrating	2	98
Heat-treated	Water borne	Penetrating	2	87
Untreated	Water borne	Semi-film forming	2	118
Heat-treated	Water borne	Semi-film forming	2	99

Note: The coating weight was obtained by measuring the decrease in the weight of paint container immediately after brush coating

4. 2.1.2 電子顕微鏡による表面観察

走査型電子顕微鏡（株日立ハイテクノロジーズ、TM3030Plus）を用いて試片の早材部表面を観察した。20 mm (L) × 20 mm (T) × 15 mm (R)の大きさに切り出した試片に蒸着などの導電処理は行わずに、加速電圧 5 kV の条件で二次電子像を観察した。

4. 2.1.3 表面粗さ測定

走査型共焦点レーザー顕微鏡（オリンパス株、LEXTOLS4000）を用いて、試片早材部の表面粗さを 20 倍の対物レンズで測定した。得られた 650 μm×650 μm の範囲の三次元データから、カットオフ値 L-フィルター 250 μm, S-フィルター 8 μm とし、ISO 25178-2²⁾に基づき、算術平均高さ (Sa) を算出した。5 個所の測定値を平均した。なお、試片は 23±2℃、

50±5%RH の試験室にて調湿してから試験に供した。

4.2.1.4 赤外分光分析法

フーリエ変換赤外分光分析装置（日本分光株、FT/IR-6100）と一回反射 ATR 装置（同、PRO450-S）を組み合わせ、ダイヤモンドプリズムを用いて試片の早材部表面の赤外吸収スペクトルを測定した。測定条件は、波数範囲 $4000\text{cm}^{-1}\sim 400\text{cm}^{-1}$ 、積算回数 30 回、分解能 8cm^{-1} とした。5 箇所測定し、再現性を確認した。なお、試片はシリカゲル入りのデシケーター内で乾燥してから試験に供した。

4.2.2 結果と考察

4.2.2.1 塗装前の無処理木材と熱処理木材の比較

図4.1に試片表面の走査型電子顕微鏡写真 (SEM 像)、図4.2に三次元像と算術平均高さ (Sa) を示す。塗装前の木材表面は図4.1のSEM像、図4.2の三次元像より、無処理木材に比べ熱処理木材の方が表面の凹凸の程度が大きいことが見てとれる。Saも熱処理木材の方が無処理木材に比べ大きかった。

木材の熱処理において、処理温度および処理時間の増加につれ、表面粗さが減少することが報告されている^{3,4)}。しかし、丸鋸で切削した後の熱処理木材は、無処理木材に比べ表面粗さが大きくなることが分かっている⁵⁾。本実験では、自動かんな盤を用いて試片の表面を平削りしたため、丸鋸で加工した場合と同様に刃の影響により、熱処理木材の方が無処理木材に比べ表面粗さが大きくなったと推測される。

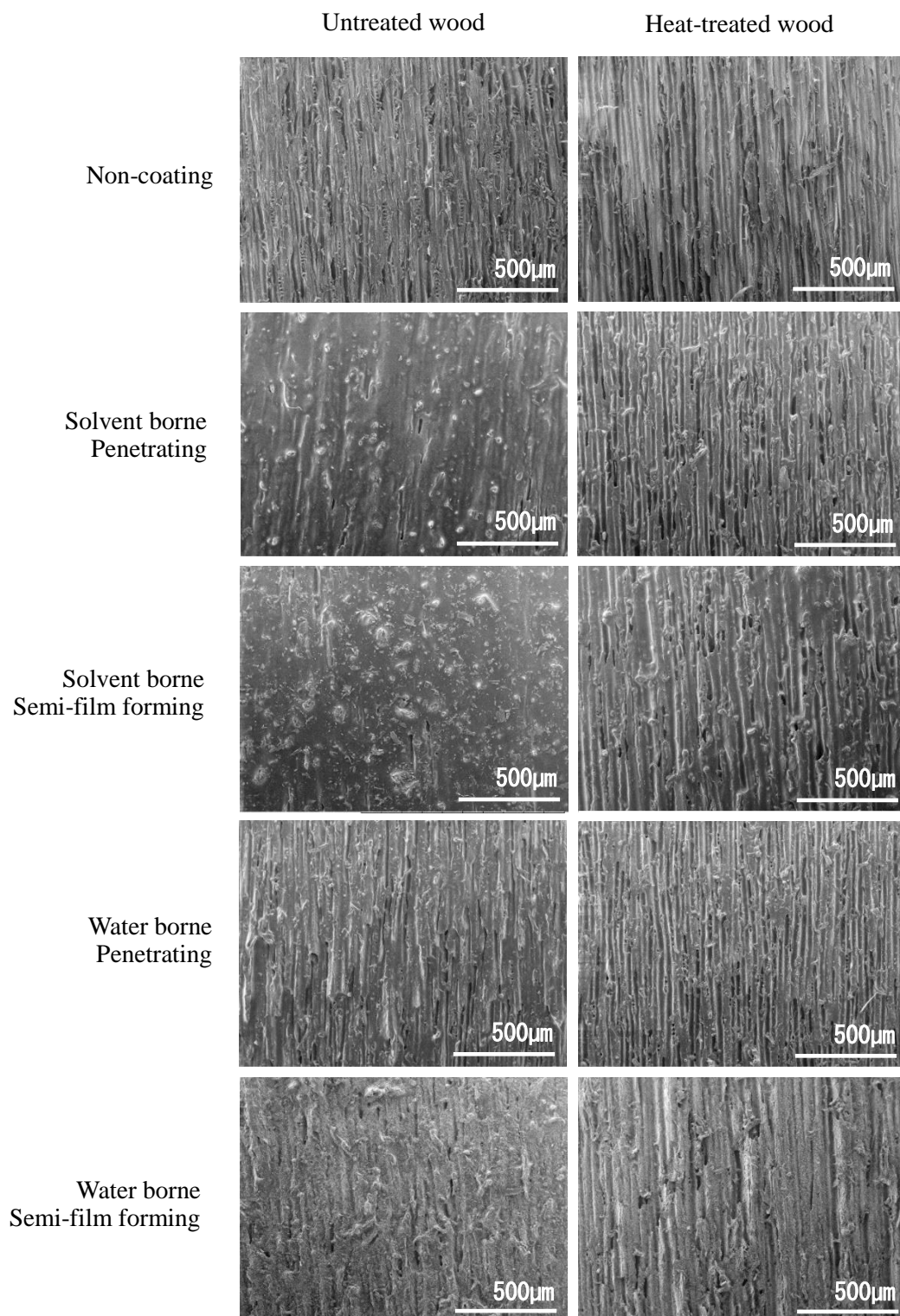


Figure 4.1 SEM images of the sample surface ($\times 100$)

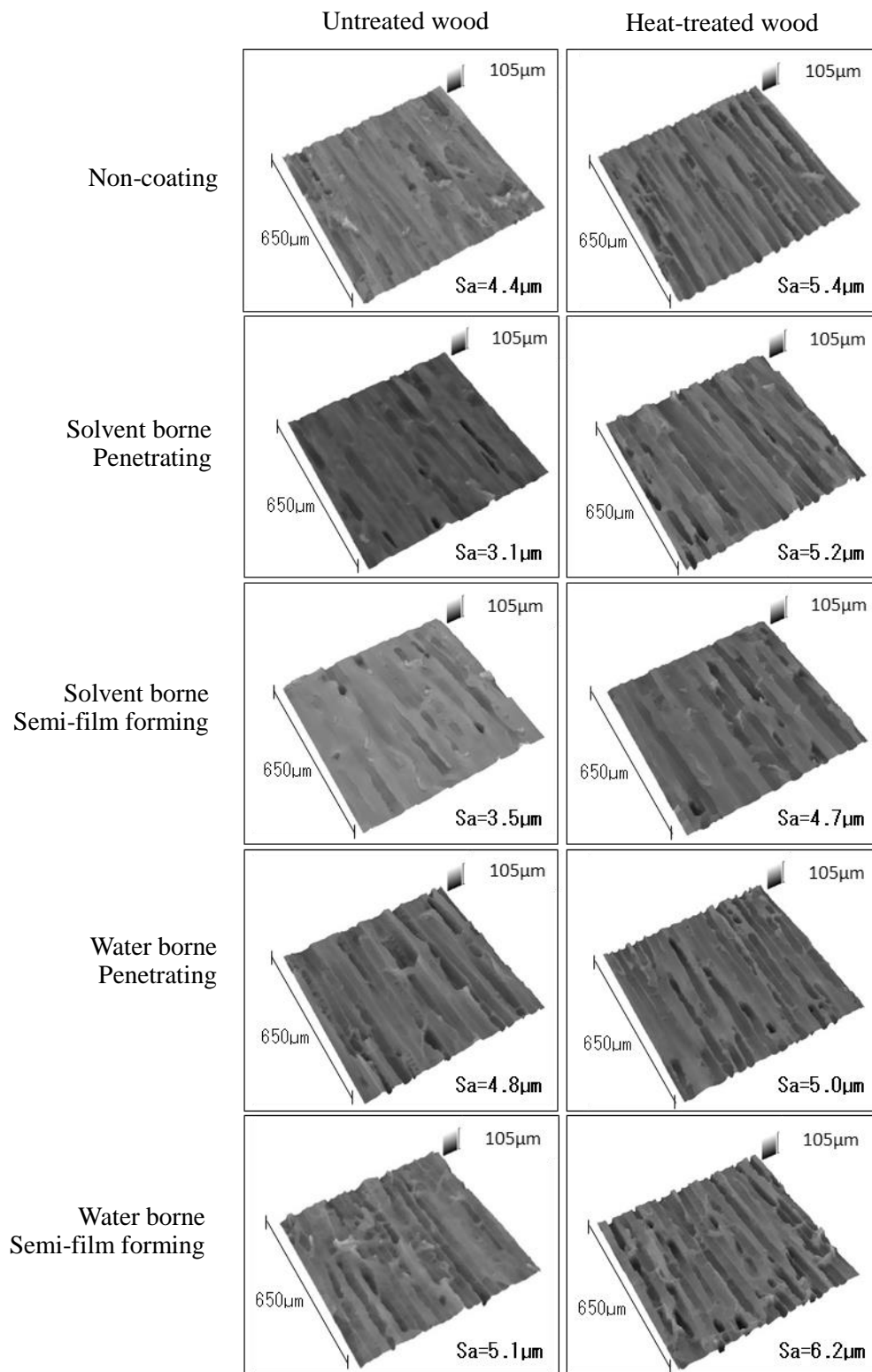


Figure 4.2 3D images and arithmetic mean deviation (Sa) values of the sample surface

4.2.2.2 塗装時の無処理木材と熱処理木材の比較

表 4.1 に示すように塗布量は、油性塗料では無処理木材に比べ熱処理木材の方が多く、水性塗料では反対に無処理木材に比べ熱処理木材の方が少なくなる傾向があった。熱処理により疎水的になるため木材表面の撥水性が高くなり⁶⁻¹⁰、水が浸透しにくくなることが報告されている⁸。一方、水では無処理木材に比べ熱処理木材の方がぬれ性が低い、水性塗料ではぬれ性が高いとの報告がある¹⁰。これは水性塗料の極性以外に表面張力や pH が影響したためだと述べられている。今回用いた塗料では、主に塗料自体の極性が影響し、熱処理木材は無処理木材に比べ水性塗料の場合は浸透しにくく塗布量が少なくなり、反対に油性塗料では浸透しやすく塗布量が多くなったと考えられる。

4.2.2.3 塗装後の無処理木材と熱処理木材の比較

図4.1のSEM像および図4.2の三次元像より、油性塗料の場合、無処理木材は熱処理木材よりも仮道管の内こうや細胞間隙が塗料で充填されており、連続した塗膜になっているのが見てとれた。表4.1より油性塗料で塗装した場合、熱処理木材は無処理木材よりも塗布量が多い傾向があったが、熱処理木材の方が無処理木材よりも塗料による仮道管の内こう等の充填が小さかった。このことから、熱処理木材は無処理木材よりも疎水的になっているために⁶⁻¹⁰、油性塗料は熱処理木材の木材内部までより浸透しやすく、木材表面に塗料が留まりにくかったと考えられる。水性塗料の場合は無処理木材と熱処理木材の間に大きな差は認められなかった。

図4.2の表面粗さ (Sa) は油性塗料、水性塗料のいずれも熱処理木材の方が無処理木材に比べ大きかった。また、塗装前と塗装後のSaを比較すると、無処理木材では塗装していない試片に比べ、油性塗料で塗装した試片はSaが小さく、反対に水性塗料で塗装した試片はSaが大きかった。熱処理木材についても水性の含浸形塗料で塗装した試片を除くと、無処理木材と同様の傾向がみられた。水や水性塗料を塗布すると、木材繊維の細片が林立して

毛羽立ちが起きる¹¹⁾。この毛羽立ちの影響により、無処理木材では水性塗料で塗装するとSaが大きく表面粗さが大きくなったと推測される。油性塗料で塗装した場合もわずかに毛羽立ちが生じるが¹¹⁾、本実験ではそれ以上に塗料による仮道管の内こう等の充填が大きかったために、油性塗料では表面が平滑になり表面粗さが小さくなったと考えられる。熱処理木材の場合、油性塗料では無処理木材に比べ塗装前と塗装後の表面粗さの差が小さかったが、これは図4.1のSEM像および図4.2の三次元像に示すように、塗料による仮道管の内こう等の充填が少なかったためだと推測される。また、熱処理木材は無処理木材よりも疎水的になっており水を吸収しにくくなっているため⁸⁾、水性塗料では塗装後の毛羽立ちが無処理木材よりも少ない傾向にあると考えられる。

4.2.2.4 赤外分光分析による定量

図4.3、図4.4に試片表面の赤外吸収スペクトルと吸収帯の位置を示す。無処理木材、熱処理木材のいずれも塗装していない試片は、最も強い吸収としてセルロース・ヘミセルロースのC-O伸縮振動が 1030 cm^{-1} 付近に認められた¹²⁾。図4.3より熱処理木材に水性の半造膜形塗料で塗装した試片を除いて、塗装することにより、 1030 cm^{-1} のピーク強度が低くなる傾向が見てとれる。塗装した試片で共通する強い吸収としては、主に塗膜由来のピークであるC=O伸縮振動が 1730 cm^{-1} 付近に認められた¹³⁾。また、アルキド樹脂系である油性塗料では、ベンゼン環のC-H面外変角振動による吸収が 730 cm^{-1} 付近に認められた¹³⁾。水性塗料では、アクリル樹脂の特性吸収が、 840 cm^{-1} 付近と 1060 cm^{-1} 付近に認められた¹³⁾。

試片表面の塗膜の被覆の程度を評価することを目的に、主に木材由来のピークである 1030 cm^{-1} の吸収と主に塗膜由来のピークである 1730 cm^{-1} の吸収に着目し、ピーク高さ比($1030\text{ cm}^{-1}/1730\text{ cm}^{-1}$ 比)を求めた。なお、FTIR-ATR分析では、試料とプリズムの押し付け強さや試料の硬さ・形状によって両者の密着面積が変化しやすく、ピーク強度の解析に影響を及ぼすことがある。本実験では、そのような影響を避けるために、木材由来のピーク

と塗膜由来のピークを単独で評価せず、両者のピーク高さ比を求めることにした¹⁴⁾。また、最も強い吸収のピーク強度が0.15程度の吸光度となるよう試料とプリズムの押し付け強さを調整して測定を行った。それぞれのピーク高さは図4.4に示すようにベースラインを引くことにより求めた。表4.2に各試片のピーク高さ比（ $1030\text{ cm}^{-1}/1730\text{ cm}^{-1}$ 比）の結果を示す。油性塗料、水性塗料のいずれも熱処理木材の方が無処理木材に比べピーク高さ比が大きく、塗装した表面に木材成分が多い（塗料による被覆効果が低い）ことが示唆された。

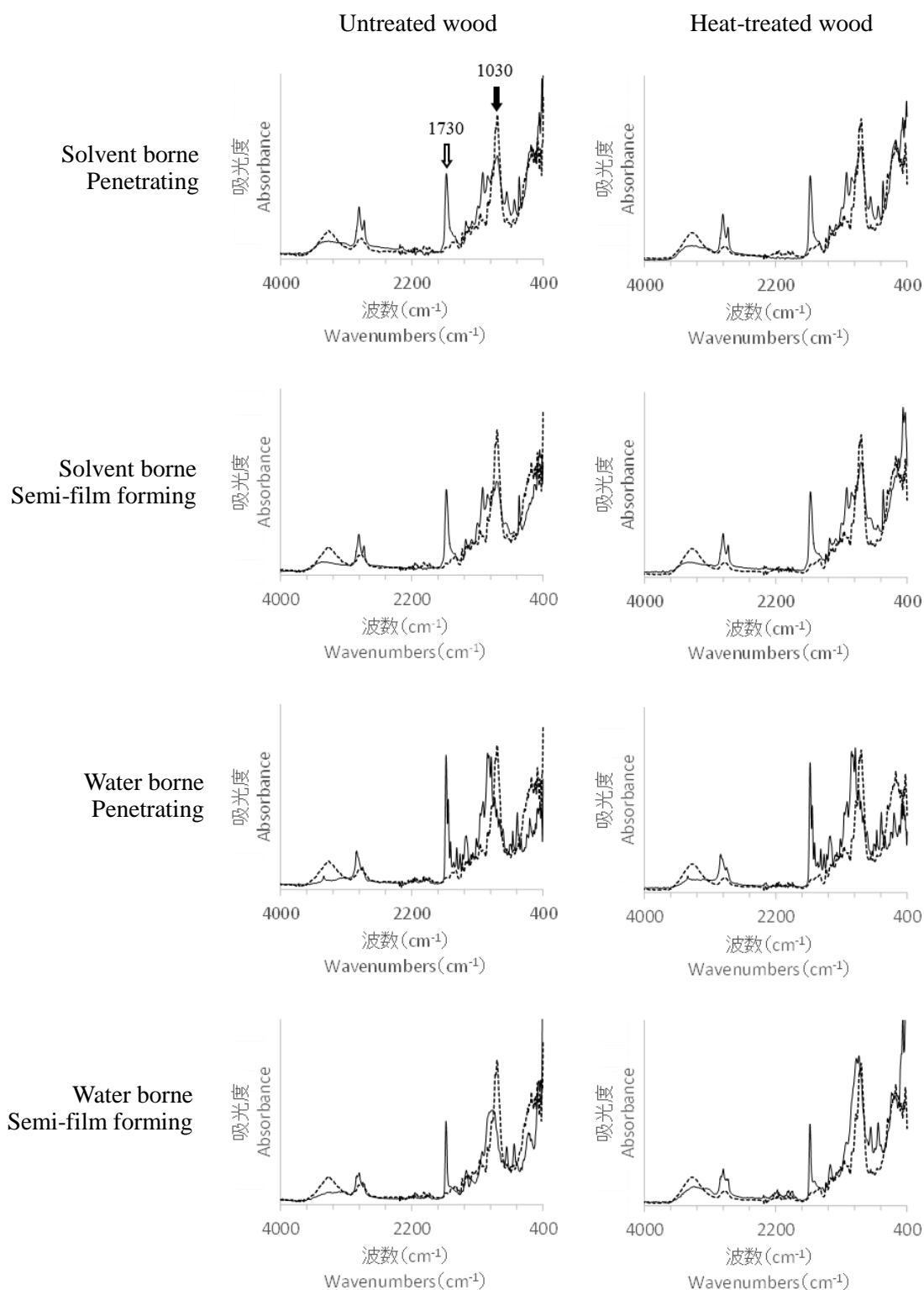


Figure 4.3 Infrared spectra of the sample surface
solid line: coated sample dotted line: uncoated sample

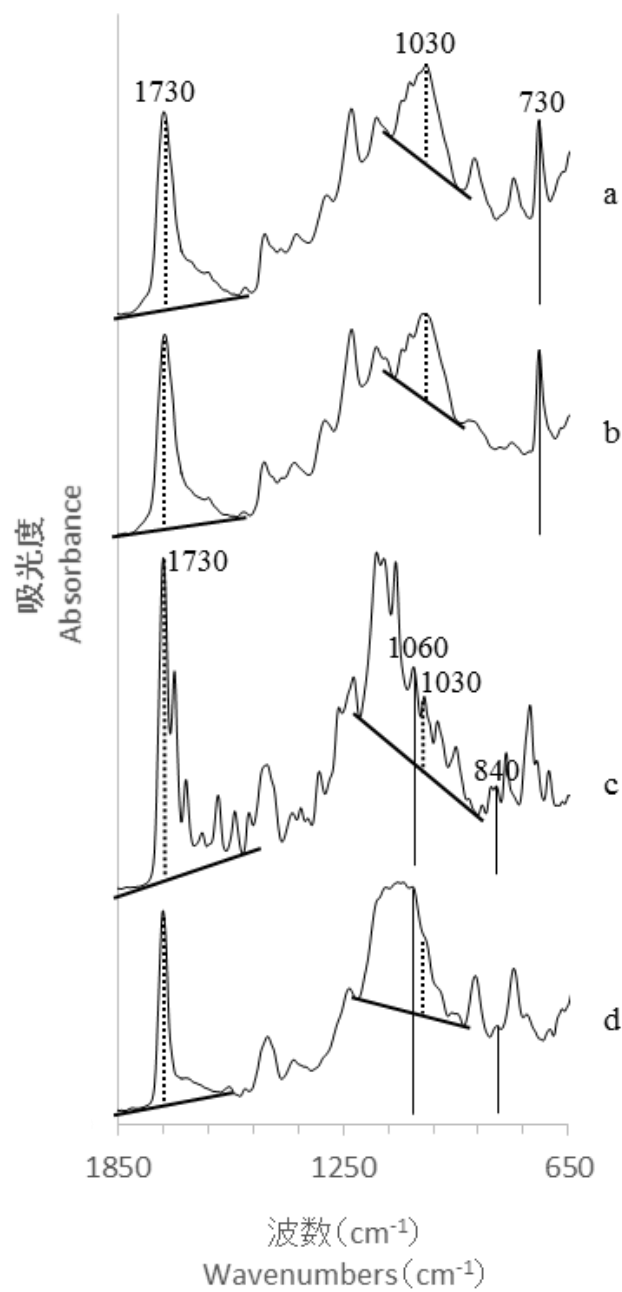


Figure 4.4 Illustration of band position and baseline-correction of infrared spectra
a) Solvent borne • Penetrating b) Solvent borne • Semi-film forming
c) Water borne • Penetrating d) Water borne • Semi-film forming

Table 4.2 Band height ratios in infrared spectrum

Presence of heat treatment	Type of dissolvent of coating	Type of coating layer	Band height ratios (1030cm ⁻¹ /1730cm ⁻¹)
Untreated	Solvent borne	Penetrating	0.58
Heat-treated	Solvent borne	Penetrating	0.62
Untreated	Solvent borne	Semi-film forming	0.47
Heat-treated	Solvent borne	Semi-film forming	0.59
Untreated	Water borne	Penetrating	0.22
Heat-treated	Water borne	Penetrating	0.30
Untreated	Water borne	Semi-film forming	0.36
Heat-treated	Water borne	Semi-film forming	0.95

今回供試した試験体では熱処理木材は無処理木材に比べ、塗装面の表面粗さが大きく (図 4.2)、また木材表面が塗料で覆われにくい傾向があることが分かった。これは、塗装前の熱処理木材がプレーナー仕上げにより表面の凹凸の程度が大きくなったこと、撥水性が高いこと⁶⁻¹⁰⁾などが影響し、木材表層への塗料の浸透性が異なったためだと考えられる。塗膜の厚さや木材表層の塗料の浸透性が耐候性能に影響することが報告されており¹⁵⁻¹⁷⁾、本研究においても熱処理木材と無処理木材の塗装面の違いが耐候性能に現れる可能性がある。今後、耐候性試験を行い、性能を確認する必要がある。

4.3 塗装した熱処理木材の耐候性能評価

4.3.1 実験方法

4.3.1.1 試料

4.2.2.1 において作製した無塗装および塗装した熱処理木材を試験に用いた。表 4.3 に試片の塗装条件および屋外暴露前の測色値を示す。それぞれ 2 片ずつ屋外暴露試験に供した。

Table 4.3 Description of coating systems and color parameters before outdoor exposure

Presence of heat treatment	Type of dissolvent of coating	Type of coating layer	Initial color parameters		
			L^*	a^*	b^*
Untreated	—	—	73.0	6.0	22.4
Heat-treated	—	—	39.2	11.3	21.4
Untreated	Solvent borne	Penetrating	39.0	10.6	19.9
Heat-treated	Solvent borne	Penetrating	28.6	8.4	11.8
Untreated	Solvent borne	Semi-film forming	26.2	9.9	15.6
Heat-treated	Solvent borne	Semi-film forming	22.4	6.5	9.0
Untreated	Water borne	Penetrating	33.4	6.2	15.4
Heat-treated	Water borne	Penetrating	27.7	4.2	10.8
Untreated	Water borne	Semi-film forming	37.3	6.0	18.0
Heat-treated	Water borne	Semi-film forming	35.9	6.2	17.0

4.3.1.2 屋外暴露試験

屋外暴露試験は、JIS K 5600-7-6¹⁸⁾に基づき、東京都江東区（北緯 35 度 62 分、東経 139 度 78 分）において、2012 年 6 月から 24 か月間実施した。試片は繊維方向を縦に、南向き傾斜 45 度の条件で設置した。屋外暴露期間中の気象条件を表 4.4 に示す。

Table 4.4 Climate conditions during outdoor exposure

Daily mean temperature (averaged) (°C)	Mean relative humidity (averaged) (%)	Total precipitation (accumulated) (mm)	Total sunshine hours (accumulated) (hours)	Daily total global solar radiation (averaged) (MJ/m ²)
17.0	61.1	3210	4357	14.3

Note: Based on the Japan Meteorological Agency's climate statics¹⁹⁾ observed at Chiyoda Ward, Tokyo, about 8 km distant from the outdoor exposure test site.

4.3.1.3 測色

色差計（日本電色工業㈱、NF333）を用いて、試片表面の CIELAB 色空間における L^* （明度）、 a^* （正：赤方向，負：緑方向）、 b^* （正：黄方向，負：青方向）を測定し、以下の式(4.1)～(4.4)により ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 、 ΔE^*_{ab} （色差）を計算し

た。測色条件は、光源を D65、視野角を 10 度、測色部の直径を 8mm とし、1 試片につき定位 3 箇所を測定し、測定値を平均した。

$$\Delta L^* = L^*_n - L^*_0 \quad (4.1)$$

$$\Delta a^* = a^*_n - a^*_0 \quad (4.2)$$

$$\Delta b^* = b^*_n - b^*_0 \quad (4.3)$$

$$\Delta E^*_{ab} = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{1/2} \quad (4.4)$$

ここで、

L^*_0 、 a^*_0 、 b^*_0 : 屋外暴露前の L^* 、 a^* 、 b^* 値

L^*_n 、 a^*_n 、 b^*_n : 屋外暴露 n ヶ月後の L^* 、 a^* 、 b^* 値

4.3.1.4 撥水度測定

質量を測定した試片 (W_1) の中央部に純水 1ml を滴下し、滴下部をシャーレで覆って 1 分間放置した後、試片上の水分を拭き取り、再び試片の質量 (W_2) を測定した。別途、水 1ml の質量 (W) を測定した。試片への水の浸透量 ($W_2 - W_1$) を計算し、(4.5) 式から撥水度を算出した²⁰⁾。1 試片につき 1 箇所測定し、屋外暴露開始前および開始後一定期間経過するごとに撥水度を測定した。

$$\text{撥水度 (\%)} = [1 - (W_2 - W_1) / W] \times 100 \quad (4.5)$$

4.3.1.5 マイクロスコープによる表面観察

デジタルマイクロスコープ (株)ハイロックス, KH-8700) を用いて、屋外暴露 24 ヶ月後の試片表面を 30 倍で観察した。

4.3.1.6 表面粗さ測定

走査型共焦点レーザー顕微鏡 (オリンパス(株)、LEXT OLS4000) を用いて、屋外暴露 24 ヶ月後の試片早材部の表面粗さを 20 倍の対物レンズで測定した。得

られた $1225\mu\text{m}\times 1225\mu\text{m}$ の範囲の三次元データから、カットオフ値 L-フィルター $500\mu\text{m}$ 、S-フィルター $16\mu\text{m}$ とし、ISO 25178-2²⁾に基づき、算術平均高さ (Sa) を算出した。1 試片につき 5 箇所測定し、測定値を平均した。なお、試片は $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $50\pm 5\%\text{RH}$ の試験室にて調湿してから試験に供した。

4.3.2 結果と考察

4.3.2.1 色の変化

図4.5に屋外暴露期間中の色の変化および図4.6に屋外暴露0カ月（暴露前）と24カ月後の試片の $L^* a^* b^*$ 色度図を示す。図4.5より、塗装した熱処理木材は、塗装していない熱処理木材に比べ、油性塗料、水性塗料のいずれも色差 (ΔE^*_{ab}) が小さく、塗装により熱処理木材の変色を抑制できることが分かった。また、塗装していない熱処理木材は、塗装していない無処理木材と比較すると、 L^* の変化量は小さく、 a^* の減少は大きく（赤みの減少）、 b^* の変化量はほぼ同じであった。塗装した熱処理木材と塗装した無処理木材について比較すると、 L^* と a^* の変化量はあまり大きな差が見られず、塗料の種類の違いの影響もあまり見られなかったが、 b^* については塗料の種類によって変化量の傾向が異なり、無処理木材では油性の含浸形塗料で最も減少が大きく、熱処理木材では水性の半造膜形塗料で最も減少が大きかった。このように、 L^* 、 a^* 、 b^* の変化量は試片によって異なるものもあったが、いずれの試片も屋外暴露試験により暗灰色化 (L^* 値、 a^* 値、 b^* 値が0に近づく) する傾向があった（図4.6）。塗装していない無処理木材、熱処理木材は、屋外暴露により灰色化することが知られているが²¹⁻²⁵⁾、塗装した無処理木材、熱処理木材についても、今回供試したダークブラウン色、ライトブラウン色の塗料では、屋外暴露によりいずれも暗灰色化の方向に色調が変化することが分かった。

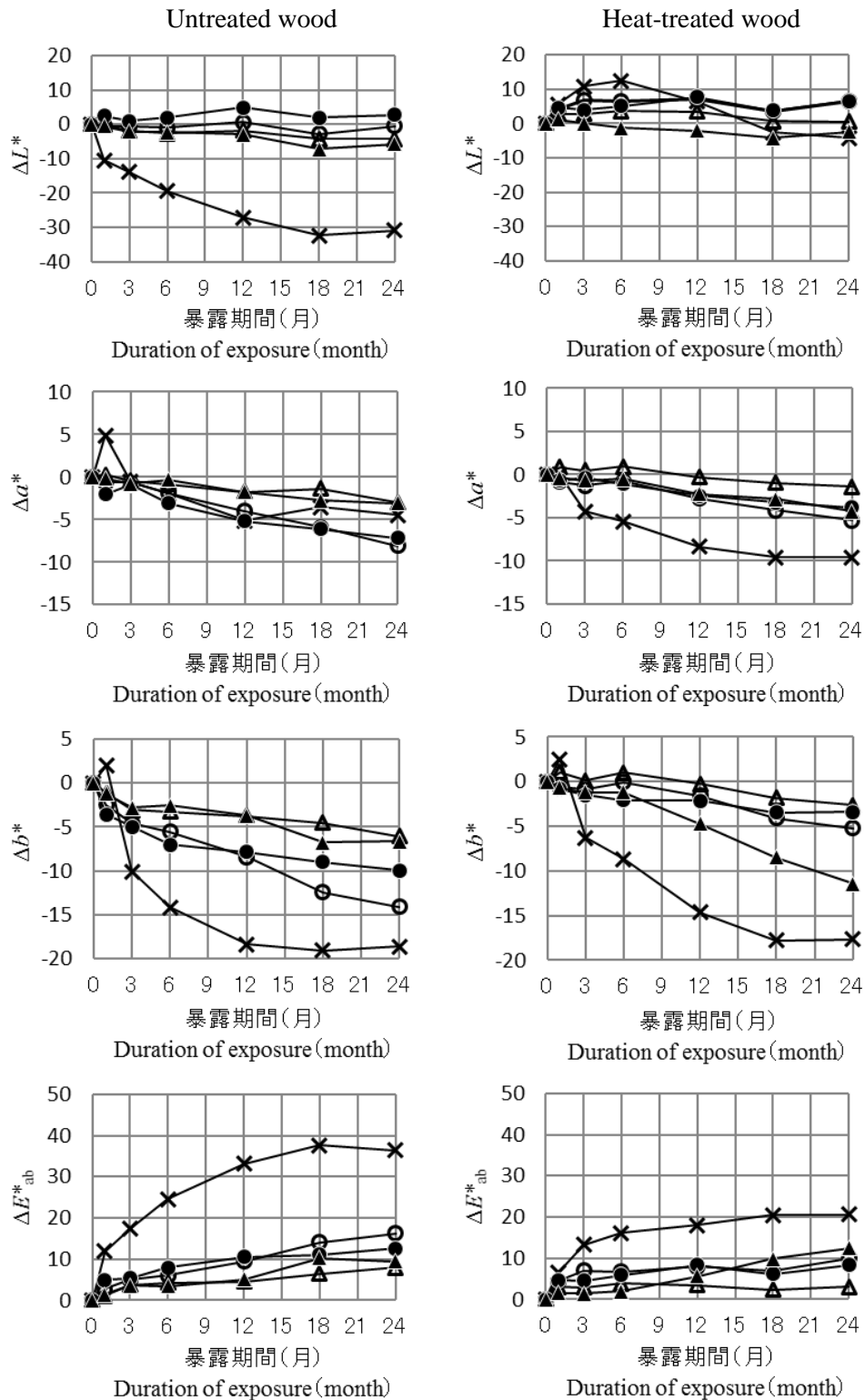


Figure 4.5 Changes in color of exposed sample surface during outdoor exposure
 ×uncoated ○Solvent borne, Penetrating ●Solvent borne, Semi-film forming
 ΔWater borne, Penetrating ▲Water borne, Semi-film forming
 ΔL^* : Lightness difference Δa^* , Δb^* : a^* , b^* difference ΔE^*_{ab} : Color difference

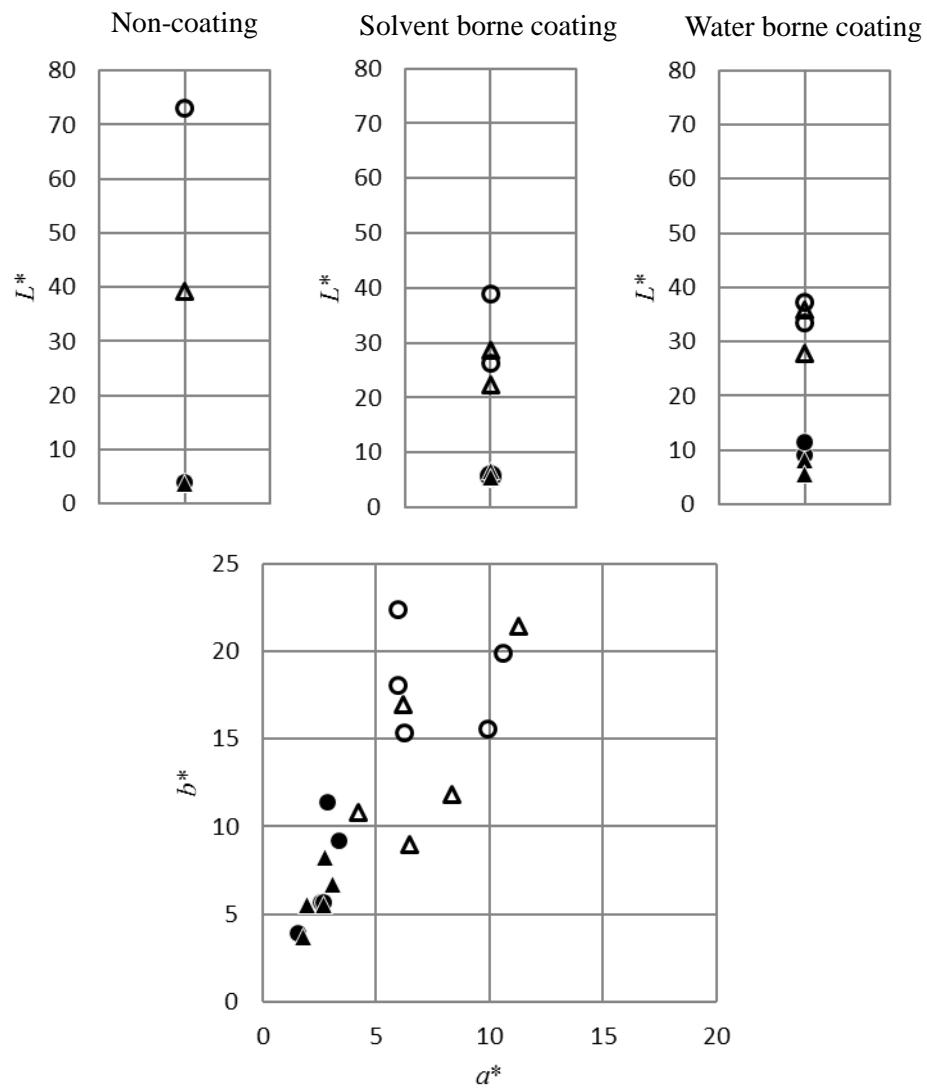


Figure 4.6 $L^*a^*b^*$ chromaticity diagram of the sample exposed for 0 month (before outdoor exposure) and 24 months
 ○ Untreated wood, 0 month ● Untreated wood, 24 month
 △ Heat-treated wood, 0 month ▲ Heat-treated wood, 24 month

4.3.2.2 撥水度の変化と表面観察

図4.7に屋外暴露期間中の撥水度の変化を示す。屋外暴露試験の初期では塗装した熱処理木材は、塗装していない熱処理木材に比べ、油性塗料、水性塗料のいずれも撥水度が高く、塗装により熱処理木材の撥水度を維持する効果が認められた。しかし、屋外暴露試験18ヶ月後には、Dunnettの多重比較（有意水準5%）より、無処理木材では塗装していない試片に比べ、塗装した試片はいずれの塗料も撥水度が高く有意な差が認められたが、熱処理木材では水性の含浸形塗料を除き、塗装していない試片と塗装した試片との間に有意な差は認められず、塗装効果が無処理木材に比べて短期間しか持続しなかった。なお、熱処理木材では屋外暴露試験18ヶ月後もおおよそ60～70%の撥水度を維持しているが、これは塗装の有無によらないことから熱処理による効果であると考えられる。

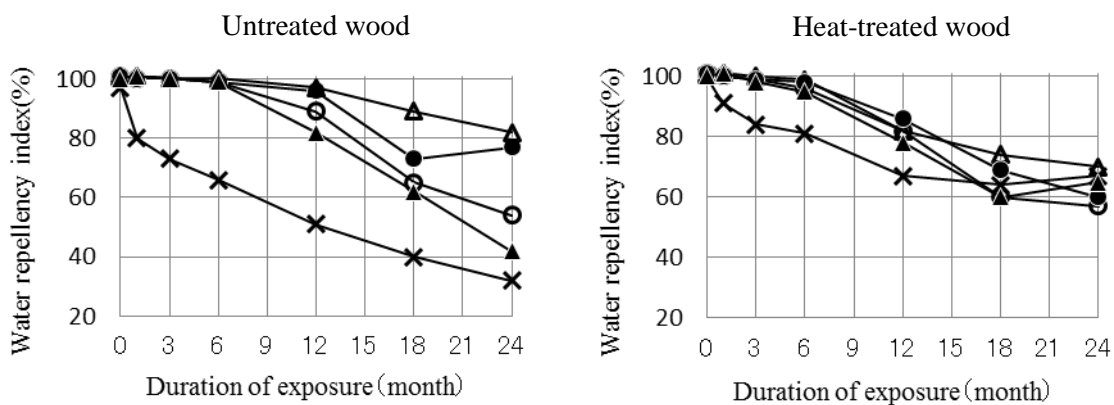


Figure 4.7 Changes in water repellency index during outdoor exposure
×Non-coating ○Oil borne, Penetrating ●Oil borne, Semi-film forming
ΔWater borne, Penetrating ▲Water borne, Semi-film forming

図4.8に屋外暴露24カ月後の試片表面のデジタルマイクロスコープ写真を示す。画像中の明るい部分が塗膜のはがれの部分を表す。熱処理木材は無処理木材に

比べ、いずれの塗料も塗膜のはがれが多く見てとれた。撥水度は、塗膜の有無に大きく左右される²⁰⁾。このことから、熱処理木材では屋外暴露により塗膜のはがれが多く発生したために、屋外暴露試験18ヶ月後には撥水度が水性の含浸形塗料を除き、塗装した試片と塗装していない試片との間に有意な差が認められず、塗装効果が無処理木材に比べ持続しなかったと考えられる。

早晩材について比較すると、熱処理木材の塗膜のはがれは特に晩材部で多く見てとれた。早材部に比べて晩材部の方が塗料の浸透性は低く^{26, 27)}、塗膜の付着性も早材部に比べ晩材部の方が低いことが報告されている²⁷⁾。また、早材と晩材の密度の差があると、膨潤、収縮ポテンシャルが異なり、早晩材の間に応力が発生し、塗膜割れやはがれが生じる²⁸⁾。熱処理による密度の減少は、晩材部よりも早材部の方が大きいことが報告されている²⁹⁾。これらのことから、熱処理により晩材部への浸透性が油性塗料、水性塗料のいずれも低下した可能性や早材と晩材との密度の差が大きくなった可能性があると考えられる。

塗膜の形成タイプについて比較すると、一般的に含浸形に比べ造膜形の塗料の方が撥水度の維持期間が長いと言われている²⁰⁾。しかし、今回検討した水性塗料では、無処理木材、熱処理木材のいずれも半造膜形に比べ含浸形の塗料の方が高い撥水度を維持しており、また塗膜のはがれは少なかった。水性塗料

(アクリル樹脂)は油性塗料(アルキド樹脂)に比べて浸透性が低く²⁶⁾、水性塗料の方が油性塗料に比べ付着性が低い³⁰⁾。そのため、投錨効果による塗膜の付着性を高めるために、塗装の前処理は研磨仕上げとすることが推奨されている。しかし、今回の検討ではプレーナー仕上げとしたため、塗膜の付着性が低く、無処理木材、熱処理木材のいずれも水性の半造膜形塗料では塗膜のはがれが発生し、撥水度が低下しやすかったと考えられる。

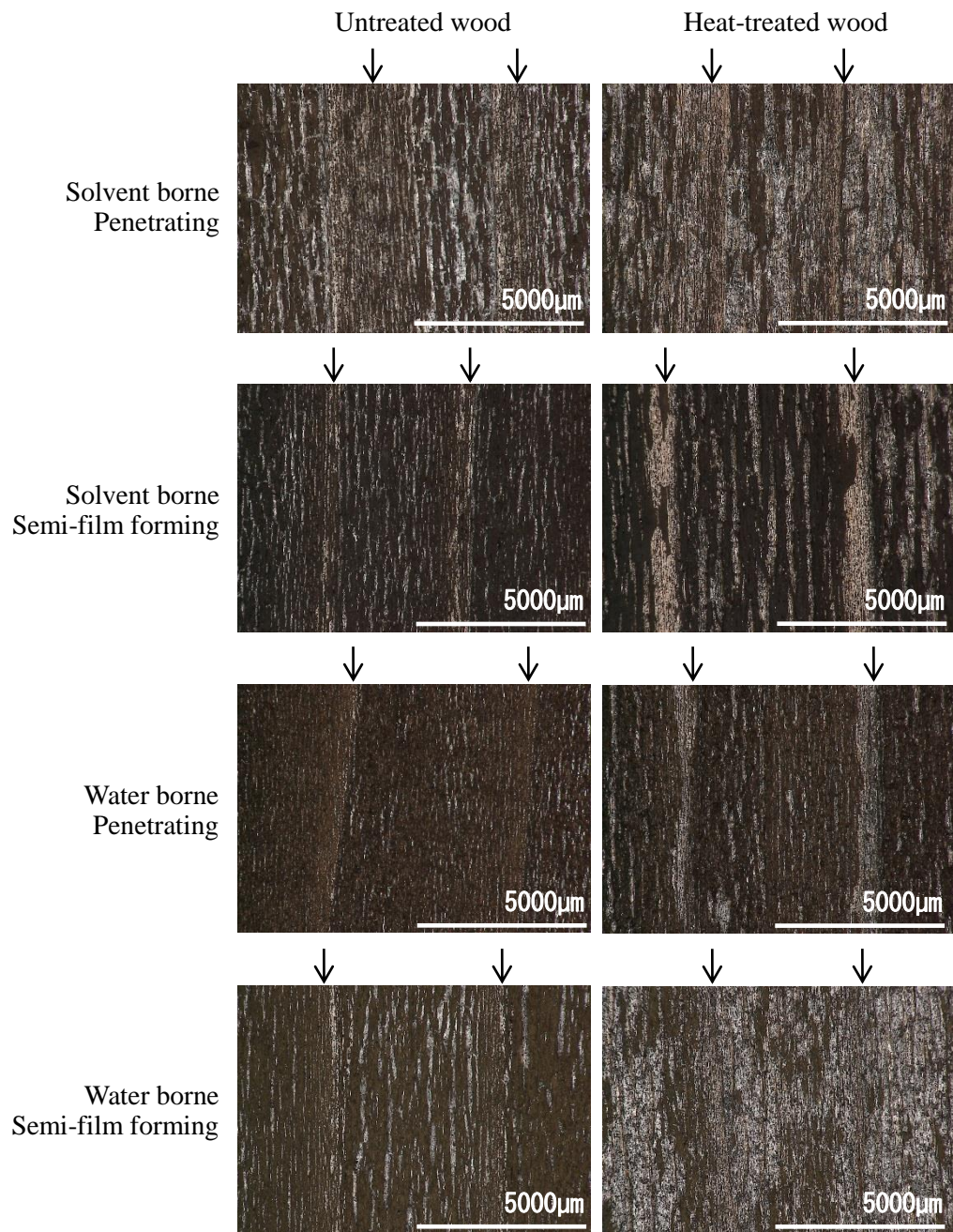


Figure 4.8 Optical microscope photographs of the sample surface exposed for 24 months
→ : latewood

4.3.2.3 表面粗さの変化

木材および塗装木材を屋外暴露すると、太陽光や雨水によって表面が浸食作用を受け凹凸構造となり、表面粗さは浸食の程度の目安となる³¹⁾。図 4.9 に屋外暴露 24 ヶ月後の試片表面の算術平均高さ (Sa) の結果を、図 4.10 に屋外暴露 24 ヶ月後の試片表面の三次元画像を示す。また、表 4.5 に屋外暴露 24 ヶ月後の試片表面の算術平均高さ (Sa) の二元配置分散分析の結果を示す。二元配置分散分析より、木材の熱処理の有無と塗料の種類との間に交互作用が認められ、Tukey-Kramer 法 (有意水準 5%) により全群の多重比較を行った。無処理木材では、水性の含浸形塗料の試片と塗装していない試片との間に有意な差が認められ、水性の含浸形塗料の試片は塗装していない試片に比べて Sa が低く、塗装による浸食の抑制効果が認められた。一方、熱処理木材ではいずれの塗料も塗装していない試片との間に有意な差は認められず、塗装による浸食の抑制効果が認められなかった。また、熱処理木材と無処理木材との間には、水性半造膜形塗料を除き、塗装した試片と塗装していない試片のいずれも有意な差が認められ、熱処理木材は無処理木材に比べて Sa が高く、熱処理木材は無処理木材に比べ浸食作用を受けやすい傾向があることが分かった。

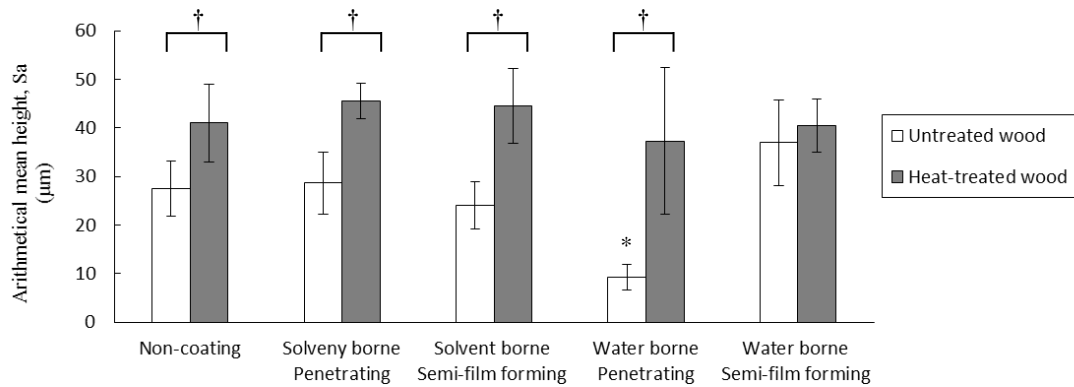


Figure 4.9 Arithmetical mean height (Sa) of the sample surface exposed for 24 months
 * indicates significant difference between Non-coating and coating. ($p < 0.05$, Tukey-Kramer test)
 † indicates significant difference between untreated wood and heat-treated wood. ($p < 0.05$, Tukey-Kramer test)
 Error bars indicate standard deviation.

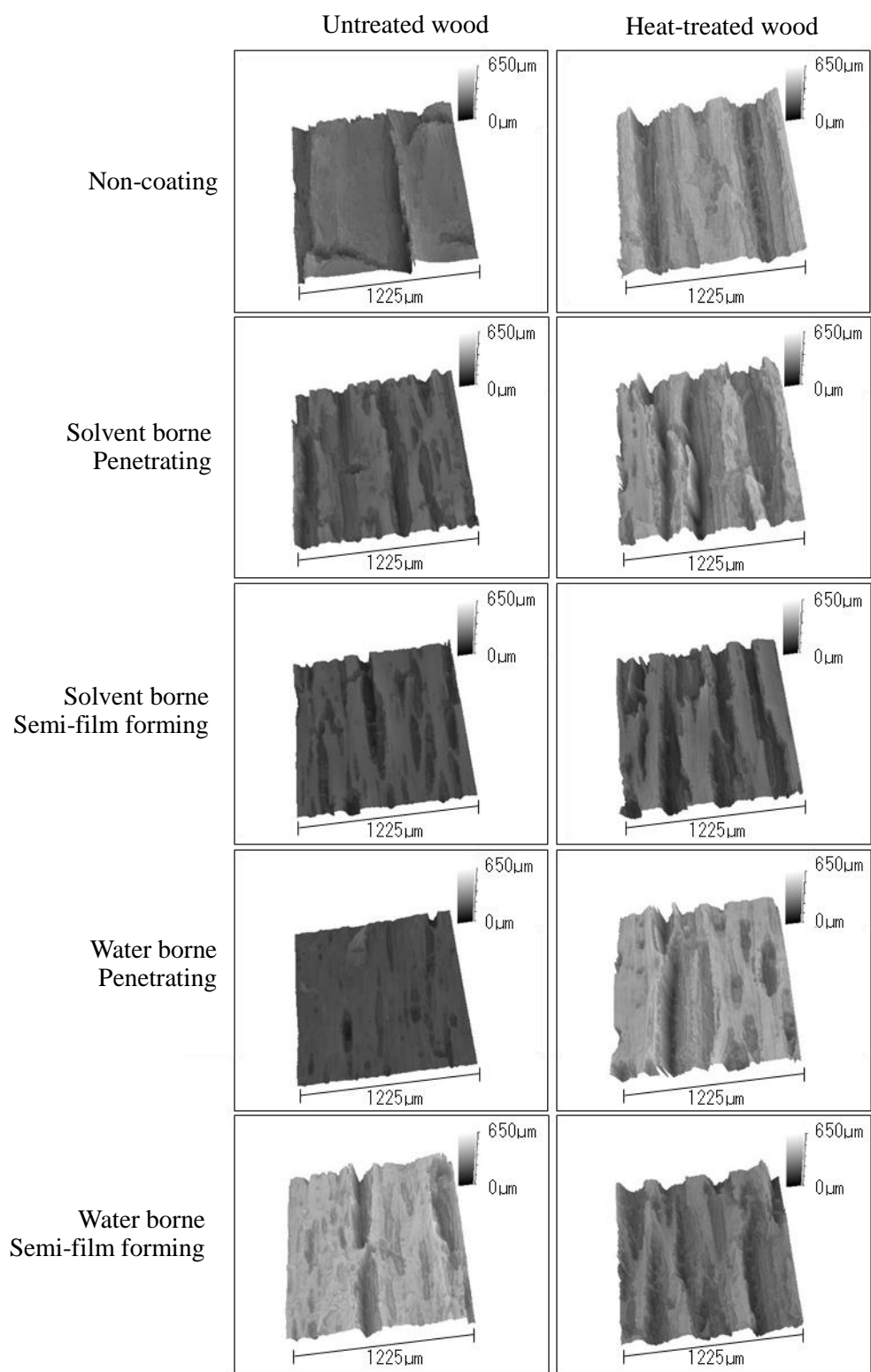


Figure 4.10 3D images of the sample surface exposed for 24 months

Table 4.5 Result of two-way analysis of variance on arithmetical mean height (Sa) of the sample surface exposed for 24 months

factor	degrees of freedom	sum of squares	mean squares	F value	Pr(>F)
Heat-treatment of wood	1	6806	6806	106.208	<0.001*
Type of coating material	4	2908	727	11.345	<0.001*
Heat-treatment of wood ×Type of coating material	4	1639	410	6.396	<0.001*
Residuals	90	5767	64		

* indicates statistically significant differences. ($p < 0.05$)

図 4.11 に屋外暴露 24 か月後の試片表面の算術平均高さ (Sa) と撥水度の関係を示す。表面粗さと撥水度の間には高い負の相関があることが報告されている³¹⁾。本研究でも同様に無処理木材、熱処理木材のいずれも表面粗さと撥水度の間には負の相関があることが認められ、特に熱処理木材で高い相関性が認められることが分かった。また、熱処理木材は無処理木材に比べ、表面粗さが増加しても高い撥水度を維持する傾向があることが分かった。これは、熱処理木材が熱処理によって疎水的になり木材表面の撥水性が高くなっているため⁶⁻⁹⁾だと考えられる。また、木材は酸の影響で浸食が促進される^{32,33)}ことや木材の密度に比例して浸食速度が小さくなること³³⁻³⁵⁾が知られている。熱処理木材は熱処理によって酢酸やギ酸が生成されるため、通常の木材に比べ酸度が高くなっている³⁶⁾。また、熱処理木材は無処理木材に比べて密度が低かった。これらの影響により、無処理木材に比べて屋外暴露試験での浸食作用を受けやすく、表面の撥水度が高い状態でも表面粗さが増加したと推測される。

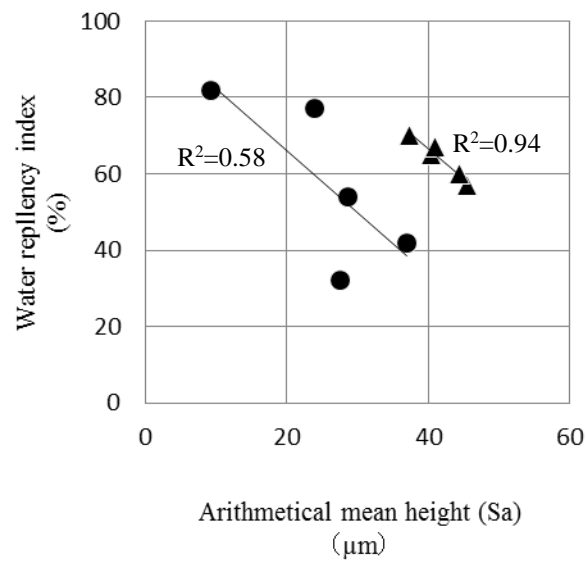


Fig. 7 Relationship between Arithmetical mean height (Sa) and water repellency index of the sample surface exposed for 24 months
 ●Untreated wood ▲Heat-treated wood

本実験では、塗装木材の耐候性能を判定する基準の一つである撥水度^{20, 37)}を用いて熱処理木材の耐候性能を評価した。しかし、熱処理木材では無処理木材に比べて撥水度が高い場合であっても熱処理木材の方が、図4.8より塗膜のはがれが発生することや図4.11より表面粗さが大きい傾向があることが分かり、撥水度では熱処理木材の耐候性能を十分に評価できないことが分かった。このことから、熱処理木材に合わせた耐候性能を判定する新しい劣化評価の開発が重要であると考えられる。

既報¹⁴⁾において、水性塗料では熱処理木材は無処理木材に比べ、塗料の塗布量（浸透量）が少なく、また、木材表面には塗膜成分が少なく、塗料が木材表面を覆いにくい傾向があった。一方、油性塗料では、水性塗料と同様に熱処理木材は無処理木材に比べて木材表面には塗膜成分が少なかったが、塗布量（浸透量）は多い傾向があった。油性塗料では、熱処理木材は塗布量が多くなる傾

向があったことと、熱処理により疎水的になっていることから^{3,4,9,10)}、無処理木材よりも熱処理木材の方が耐候性が高い可能性があると予測された。一方、水性塗料では熱処理木材は、塗布量が少なく、木材表面の塗膜成分も少ない傾向があったため、無処理木材に比べ熱処理木材の方が耐候性が低いと予測された。

屋外暴露試験により、今回供試した試験体では油性塗料、水性塗料のいずれも熱処理木材の変色の抑制は認められたが、塗膜のはがれが多く発生し、撥水度の維持期間が短く、また、浸食に対する抑制効果は低く、十分な塗装効果が認められなかった。水性塗料では熱処理木材の方が無処理木材に比べ塗装効果が低いことは予測どおりであったが、油性塗料でも同様に熱処理木材は無処理木材に比べ、撥水度の維持期間が短く、塗膜のはがれと浸食が大きく、塗装効果が低かった。このことから、塗装した熱処理木材の耐候性能の検討にあたっては、塗布量や塗料の油性、水性だけでなく、木材表面に留まり塗膜を形成する成分と木材中に浸透する成分のバランスや、木材表面への付着性などの影響についても解析を進めることが重要であると考えられる。今後は、それらの因子も考慮した熱処理木材用の塗料の開発が重要となる。

4.4 まとめ

屋外暴露試験により、今回供試した試験体では油性塗料、水性塗料のいずれも熱処理木材の変色の抑制は認められたが、塗膜のはがれが多く発生し、撥水度の維持期間が短く、また、浸食に対する抑制効果は低く、十分な塗装効果が認められなかった。水性塗料では熱処理木材の方が無処理木材に比べ塗装効果が低いことは予測どおりであったが、油性塗料でも同様に熱処理木材は無処理木材に比べ、撥水度の維持期間が短く、塗膜のはがれと浸食が大きく、塗装効

果が低かった。このことから、塗装した熱処理木材の耐候性能の検討にあたっては、塗布量や塗料の油性、水性だけでなく、木材表面に留まり塗膜を形成する成分と木材中に浸透する成分のバランスや、木材表面への付着性などの影響についても解析を進めることが重要であると考えられる。今後は、それらの因子も考慮した熱処理木材用の塗料の開発が重要となる。

第 5 章 熱処理木材の塗装における塗膜の機械的性質と表面割れの関係

5.1 はじめに

第 2 章の熱処理木材に発生する表面割れの形態の解析結果をふまえ、本章では、熱処理木材の表面割れの抑制効果と塗膜の機械的性質について検討した。ガラス転移点および水酸基価の条件が異なるウレタン樹脂塗料を試作し、塗装した熱処理木材の促進耐候性試験を行い、熱処理木材の表面割れ発生の抑制効果を調べた。

5.2 実験方法

5.2.1 木材の熱処理

スギ (*Cryptomeria japonica*) の板目の辺材 (150 mm (L) ×70 mm (T) ×20 mm (R)) を供試材とした。第 2 章 2.1.1 と同様の方法で、常圧、窒素雰囲気下、処理温度 220℃、処理時間 6 時間の条件で熱処理を行った。比較用に無処理のスギも試験に用いた。全乾密度は熱処理木材、無処理木材のいずれも 0.31 g/cm³ であった。

5.2.2 塗料の試作

塗料の樹脂はウレタン樹脂系について検討した。表 5.1 に示す市販のポリオール 4 種類と市販のイソシアネート 1 種類 (NCO5.9-6.9%) の組み合わせで、NCO/OH 当量比=1 となるよう配合し、計 4 種類の樹脂 (塗料) を試作した。

Table 5.1 Hydroxyl value and glass transition temperature of polyols

Code	Hydroxyl value (mgKOH/g)	Glass transition temperature (°C)
A	24.0-30.0	45
B	47.0-53.0	50
C	29.5-35.5	20
D	23.0-29.0	95

5.2.3 塗装試片の作製と促進耐候性試験

5.2.1 で熱処理した木材試片に 5.2.2 で試作した塗料を用いて、塗装試片を作製した。直接木材に試作塗料を塗布すると付着性が低く、塗膜のはがれが生じやすいため、下塗り用のウレタン樹脂系塗料を塗布後に試作塗料をそれぞれ塗布した。下塗り用のウレタン系塗料を塗布量 $20\sim 30\text{ g/m}^2$ で 1 回塗布した後に、試作塗料を塗布量 $60\sim 85\text{ g/m}^2$ で 2 回塗布の条件でエアスプレーで塗装し、塗装試片を作製した。表 5.2 に塗装工程を示す。各条件につき 3 片ずつ作製し、促進耐候性試験に供した。促進耐候性試験は、第 2 章 2.2.2 と同様の方法で 300 時間および 500 時間行った。促進耐候試験後の試片に発生した表面割れを目視で評価し、割れの長さはノギスを用いて測定した。

Table 5.2 Coating process

Steps	Contents of work
1. Surface preparation	Sanded with P180 sandpaper
2. Undercoating	One coats with spray, 2 hours or more of drying
3. Sanding	Sanded with P320 sandpaper
4. Top coating (Applied trial coating)	two coats with spray

5.2.4 塗膜の引張試験

試作した塗料から遊離塗膜（ぬれ膜厚：約 $270\mu\text{m}$ ）を作製し、引張試験を行

った。引張試験はオートグラフ（AG-100kN Xplus、島津製作所）を用いて、試片の幅 5 mm、クロスヘッドスピード 10mm/min、スパン 50 mm の条件で行った。5 試片ずつ試験に用いた。

5.2.5 塗膜の動的粘弾性測定

試作した塗料から遊離塗膜（ぬれ膜厚：約 510 μ m）を作製し、動的粘弾性測定を行った。動的粘弾性測定装置（RSAIII、テュー・エイ・インスツルメント社）を用いて、測定モードは引張とし、試片の幅 5 mm、スパン 20 mm、周波数 11 Hz、昇温速度 2 $^{\circ}$ C/min、初期荷重 0.5 N、ひずみ率 0.3%、測定温度範囲 -60 $^{\circ}$ C~150 $^{\circ}$ C の条件で測定した。貯蔵弾性率 E' の高温平坦部から架橋密度 n (mol/cc)を次の式(5.1)から算出した。また、損失正接 $\tan\delta(E''/E')$ のピーク温度をガラス転移点とした。

$$n = E' / RT \quad (5.1)$$

E' ：貯蔵弾性率、 R ：気体定数、 T ：絶対温度

5.3 結果と考察

図 5.1 に促進耐候性試験後に発生した塗装試片の表面割れの長さの結果を示す。表 5.3 に引張試験を行ったときの塗膜の機械的性質の結果を、図 5.2 に塗膜の応力-ひずみ線図を示す。図 5.3 に遊離塗膜の動的粘弾性測定の結果を、表 5.4 に塗膜のガラス転移点と架橋密度の結果を示す。

熱処理木材では、塗膜 D の試片で表面割れが認められなかった。塗膜 D は引張試験の結果より、引張弾性率、降伏応力、破壊ひずみが大きい傾向があることが分かった。また、動的粘弾性測定の結果より、ガラス転移温度が高く、促進耐候試験を実施している温度付近（ブラックスタンダード温度、照射時 65 $^{\circ}$ C、水噴霧時 40~45 $^{\circ}$ C ぐらい）では貯蔵弾性率の変化と熱膨張係数が低い傾

向があることが分かった。このことから、熱処理木材に対しては、硬く靱性があり、ガラス転移温度が高い塗膜が表面割れの抑制効果が大きいと示唆された。熱処理による細胞壁の薄化、強度低下などが影響し、硬く靱性のある塗膜が熱処理木材に対して表面割れの抑制効果を示したと推測される。一方、無処理木材は表面割れの発生に違いがあまり認められなかった

また、熱処理木材は無処理木材に比べて表面割れの本数は少ないが、長さのある大きな割れが発生する傾向があった。熱処理木材は寸法安定性があるが、促進耐候試験により劣化が進行すると寸法安定性が低下する傾向があることが、他の実験により分かってきている。このことから、促進耐候試験の初期は熱処理木材の寸法安定が高いため表面割れが発生しにくい、劣化が進行するにつれて寸法安定性が低下し、木材の動きを塗膜が抑制できなくなったところで、急激に大きな表面割れに進展すると推測される。

表 3 に試作した塗膜の機械的性質の結果を、図 5 に塗膜の応力-ひずみ線図を示す。また、図 9 に促進耐候試験後に試片に発生した表面割れの長さを示す。熱処理木材では、塗膜 5 の試片で表面割れが認められなかった。このことから、引張ヤング率、降伏応力、破壊ひずみの大きい、硬く靱性のある塗膜は熱処理木材の表面割れの抑制効果が大きいことが示唆された。一方、無処理木材では塗膜 3 で表面割れが認められなかったため、引張ヤング率が小さく、軟らかい塗膜は表面割れの抑制効果があると示唆された。塗膜 3 と同様に引張ヤング率の低い塗膜 4 では表面割れが発生したが、これは塗膜の機械的性質以外に塗膜の透湿性や光透過性などの性質の違いが影響したためだと考えられる。熱処理木材では熱処理による細胞壁の薄化、密度低下、強度低下などが影響し、硬く靱性のある塗膜が表面割れの抑制効果を示したと推測される。

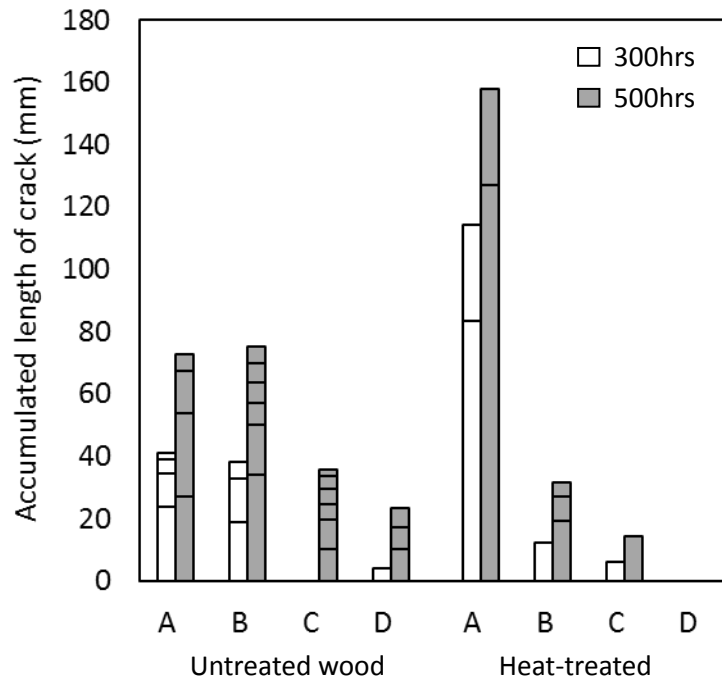


Fig. 5.1 Accumulated length of crack after xenon-arc accelerated weathering 300hrs and 500hrs

Table 5.3 Mechanical properties of coating films

Code	E (MPa)		σ_{\max} (MPa)		ε_{\max}	
	Average	SD*	Average	SD	Average	SD
A	138	9.9	14	0.74	1.7	0.15
B	7.7	1.9	4.7	0.70	1.2	0.12
C	2.7	0.38	2.2	0.35	1.7	0.12
D	478	38	14	1.4	1.5	0.26

*: Standard deviation

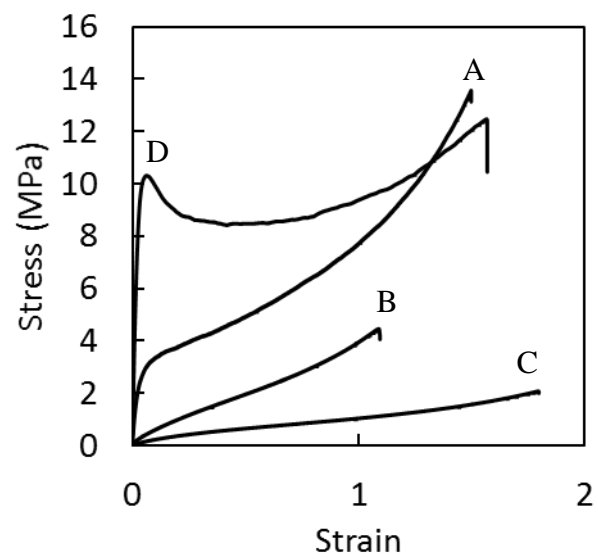


Fig. 5.2 Stress-Strain curve of coating films

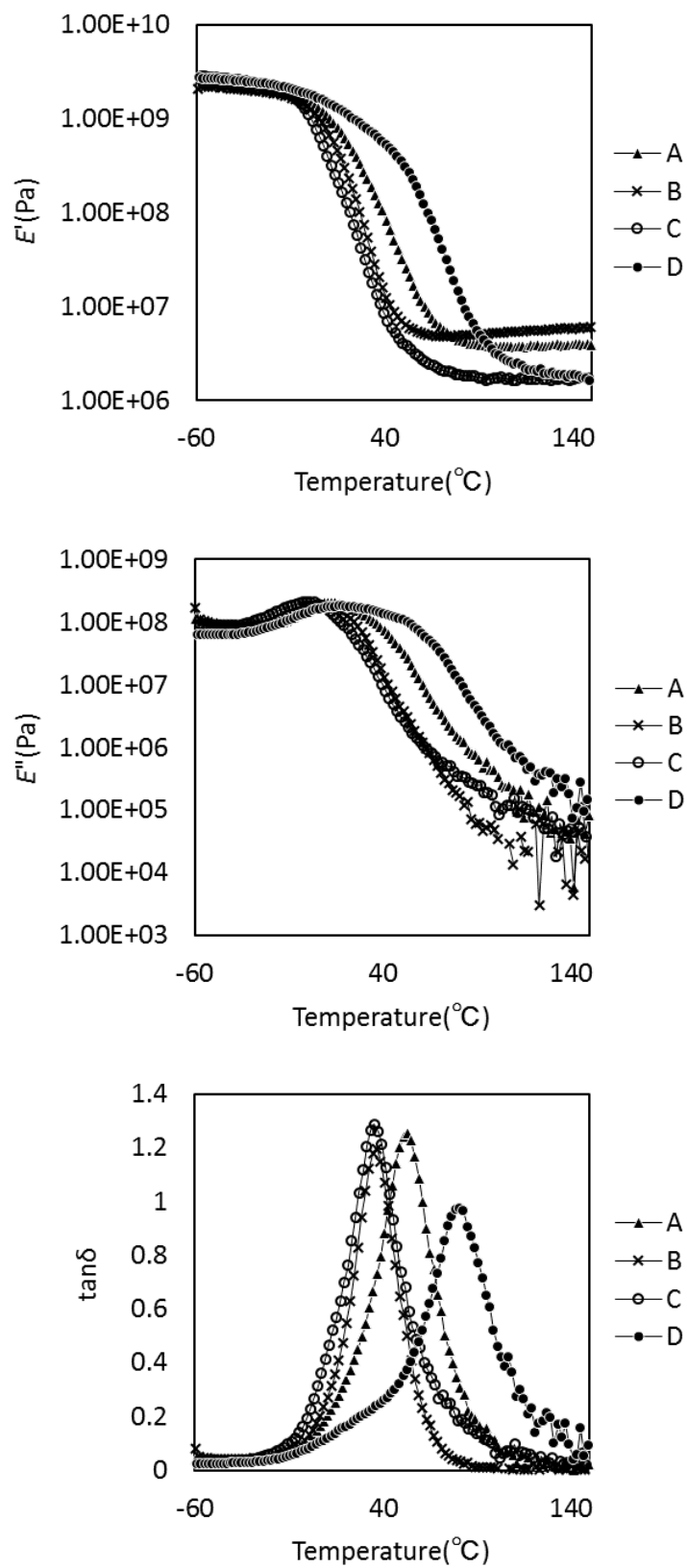


Fig. 5.3 Results of the dynamic viscoelastic measurements of coating film

5.4 まとめ

機械的性質の異なるウレタン樹脂系塗料を試作し、塗装した熱処理木材の促進耐候性試験を行い、熱処理木材に発生する表面割れの抑制効果と塗膜の機械的性質との関係を検討した。市販のポリオール 4 種類（表 2）と市販のイソシアネート 1 種類（NC05.9-6.9%）の組み合わせで、NC0/OH 当量比=1 となるよう配合し、計 4 種類のウレタン樹脂系塗料を試作した。試作した塗料のフィルムの応力-ひずみ線図を図 3 に示す。No. 4 で塗装した試験体は、促進耐候性試験 500 時間後に表面割れの発生が認められず、熱処理木材には引張ヤング率、降伏応力、破壊ひずみの大きい、硬く靱性のある塗膜が表面割れの抑制効果が大きいことが示唆された。

第6章 結論

熱処理木材は耐朽性や寸法安定性があり、薬品類を用いず熱処理のみで製造することから、環境に配慮した材料として需要が伸びており、特に屋外での利用が拡大している。しかし、屋外で使用した場合、変色や表面割れなどの問題が発生することが分かっている。木材を気象劣化から守る比較的安価な方法として塗装があり、熱処理木材についても美観を維持したまま長く使用するためには、塗装による保護が有効であると考えられる。本研究では、熱処理木材に適した塗料および塗装仕様の開発に寄与する知見を得ることを目的とした。

第2章では、スギ (*Cryptomeria japonica*) の板目の熱処理木材（常圧、窒素雰囲気下、処理温度 220℃、処理時間 6 時間）の促進耐候性試験を行い、発生した表面割れを画像処理による形態的な解析を試みた。熱処理木材では表面全体に長さが短い小さな割れが発生する傾向があり、一方、無処理木材では熱処理木材に比べ局部的に長さのある大きな割れが発生する傾向があることが分かった。

第3章では、波長照射分光器を用いて、310 nm の紫外線から 490 nm の可視光をバンド幅約 20 nm、波長間隔約 25~30 nm の条件で分光・照射し、熱処理木材（辺材）の光変色と波長依存性の関係を検討した。310 nm~341 nm の短波長の紫外域では無処理木材の方が熱処理木材に比べ分光照射による色差が大きく、一方、372 nm~458 nm の長波長の紫外域～青の可視光では、反対に熱処理木材の方が無処理木材に比べ色差が大きく、熱処理木材と無処理木材では光変色が生じる波長の傾向が異なることが分かった。

第4章では、国内で一般的に使用されている市販の木材保護塗料で塗装した熱処理木材の屋外暴露試験を24カ月間行い、無処理木材との耐候性能の違いを検討した。木材保護塗料は、油性塗料（アルキド樹脂系）と水性塗料（アクリル樹脂系）の2種類、塗膜の形成タイプは含浸形と半造膜形の2種類とした。塗

装により油性塗料、水性塗料のいずれも熱処理木材の変色の抑制は認められた。しかし、熱処理木材は無処理木材に比べて撥水度の維持期間が短く、また、塗膜のはがれが多く発生し、表面粗さが増加した。今回検討した木材保護塗料では、熱処理木材に対して十分な耐候性能が得られないことが明らかとなった。屋外暴露試験前の木材表面を赤外分光分析したところ、油性塗料、水性塗料のいずれも木材表面に塗膜成分が少ない傾向があることが分かり、このことが熱処理木材の耐候性能に影響したと推測された。油性塗料では塗布量が多い傾向であるにもかかわらず、木材表面の塗膜成分は少ない傾向であったため、今後は、木材中への浸透する成分と木材表面に塗膜を形成する成分のバランス考慮した熱処理木材用の塗料の開発が重要となると考えられる。

第5章では、機械的性質の異なるウレタン樹脂系塗料を試作し、塗装した熱処理木材の促進耐候性試験を行い、熱処理木材に発生する表面割れの抑制効果と塗膜の機械的性質との関係を検討した。市販のポリオール4種類（表2）と市販のイソシアネート1種類（NCO5.9-6.9%）の組み合わせで、NCO/OH当量比=1となるよう配合し、計4種類のウレタン樹脂系塗料を試作した。試作した塗料のフィルムの応力-ひずみ線図を図3に示す。No.4で塗装した試験体は、促進耐候性試験500時間後に表面割れの発生が認められず、熱処理木材には引張ヤング率、降伏応力、破壊ひずみの大きい、硬く靱性のある塗膜が表面割れの抑制効果が大きいことが示唆された。

熱処理木材の耐候性を向上させるには、硬く靱性のある塗膜が適しており、また、長波長側の紫外域~青の可視光をカットする紫外線吸収剤・顔料の配合が重要となると示唆された。さらに、熱処理木材表面の塗膜成分を増加させるために、木材表面に留まり塗膜を形成する成分と木材中に浸透する成分のバランスを考慮する必要があると考えられる。

引用文献

序論

1. 林野庁：平成29年度 森林・林業白書 2018年6月.
2. 片岡厚：木材の気象劣化と表面保護-気象劣化のメカニズム-, 木材保存, **43** (2), 58-68 (2017).
3. 木口 実：エクステリアウッドの耐候・耐久化処理の現状—諸外国と比較して—, 木材工業技術短信, **17**(1), 16-34(1999).
4. 矢田茂樹：外装木材の初期劣化とその抑制, 木材保存, **42** (3), 127-131 (2016).
5. 桃原郁夫：熱処理と耐久性, 木材保存, **31** (1), 3-11 (2005).
6. Esteves B. M and Pereira H. M. : Wood modification by heat treatment: a review, *BioResources*, **4** (1), 370-404 (2009).
7. International Thermo Wood Association: Thermo Wood production statistics, [https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/uutiset/Production statistics2017.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/uutiset/Production%20statistics2017.pdf) (2018年11月5日参照) .
8. Nuopponen, M., Wikberg, H., Vuorinen, T., Maunu, L. S., Jämsä, S., Viitaniemi, P. : Heat-Treated Softwood Exposed to Weathering, *Journal of Applied Polymer Science.*, **91**, 2128-2134(2004) .
9. Jämsä, S., Ahola P., Viitaniemi, P. : Long-term natural weathering of coated Thermowood, *Pigment and Resin Technology*, **29**(2), 68-74 (2000).
10. Jämsä, S., Ahola P., Viitaniemi, P. : Performance of coated heat-treated wood, *Surface coatings International*, **6**, 297-300(1999).
11. Saha, S, Kocaefe, D, Sarkar, D, Boluk, Y, Pichette, A: Effect of TiO₂-coating nano-coatings on the color protection of heat-treated jack pine, *Journal of Coatings Technology and Research.*, **8**(2), 183-190(2011).
12. Feist, W. C.: Role of pigment concentration in the weathering of semitransparent

stains, *Forest Products Journal*, **38**(2), 41-44(1988).

13. 日本ペイント株式会社著：やさしい技術総説 塗料の性格と機能 21 世紀への知識と応用，日本塗料新聞社, pp.27-28 (1998).
14. 地方独立行政法人 雇用・能力開発機構 職業能力開発総合大学校 能力開発研究センター著：木工塗装法, 財団法人 職業訓練教材研究会, pp. 23-25 (2010).
15. Aavakallio, T. (訳: 吉村剛)：フィンランドにおける木材保存, 木材保存, **33**(5), 212-217(2007).

第2章

1. 矢田茂樹, 田村健: 屋外暴露による木材表層部劣化の組織学的研究, 木材学会誌, **41** (11), 1035-1042 (1995).
2. 木口実：木材の気象劣化と耐候処理 1. 木材の劣化気象因子と劣化機構, 木材保存, **19** (6), 262-271 (1993).
3. edited by Rowell, R. M.: Handbook of wood chemistry and wood composit, CRC Press, 164-165(2005)
3. 片岡厚：木材の光劣化とその深さ分析, 木材学会誌, **54** (4), 165-173 (2008).
4. Huang, X., Kocaefe, D., Kocaefe, Y., Boluk, Y., Pichette, A.: Changes in wettability of heat-treated wood due to artificial weathering, *Wood Science and Technology*, **46**, 1215-1237 (2012).
5. Huang, X., Kocaefe, D., Kocaefe, Y., Boluk, Y., Krause, C.: Structural analysis of heat-treated birch (*Betula papyrifera*) surface during artificial weathering, *Applied Surface Science*, **264**, 117-127 (2013).

第4章

1. 日本建築学会：“建築工事標準仕様書・同解説 JASS 18 塗装工事（第7次改訂版）”, 2013, pp295-296.
2. International Organization for Standardization: Geometrical product specifications (GPS)–Surface texture: Areal–Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters , ISO 25178-2, (2012).
3. Gündüz,G., Korkut,S. and Korkut, D. S. : The effect of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyanı Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *Pallasiana* var. *pallasiana*) wood, *Bioresource Technology*, **99**, 2275-2280 (2008).
4. Korkut,S. and Budakci,M. : The effect of high-temperature heat-treatment on physical properties and surface roughness of Rowan (*Sorbus aucuparia* L.) wood, *WOOD RESEARCH*, **55** (1), 67-78 (2010).
5. Budakçı,M., İlçe, A.C., Korkut, D. S. and Gürleyen,T : Evaluating the surface roughness of heat-treated wood cut with different circular saws, *BioResources*, **6** (4), 4247-4258 (2011).
6. 桃原郁夫: 熱処理と耐久性, 木材保存, **31** (1), 3-11 (2005).
7. Esteves B. M and Pereira H. M. : Wood modification by heat treatment: a review, *BioResources*, **4** (1), 370-404 (2009).
8. Huang, X., Kocaefe, D., Boluk, Y., Kocaefe, Y. and Pichette, A. : Effect of surface preparation on the wettability of heat-treated jack pine wood surface different liquid, *Eur. J. Wood Prod.*, **70**, 711-717 (2012).
9. Hakkou, M., Pétrissans, M., Bakali, I. E., Gérardin, P. and Zoulalian, A. : Wettability changes and mass loss during heat treatment of wood, *Holzforschung*, **59**, 35-37 (2005).
10. Petrič, M., Knehtl, B., Krause, A., Militz, H., Pavlič, M., Pétrissans, M., Rapp, A., Tomažič, M., Welzbacher, C. and Gérardin, P. : Wettability of waterborne coatings on

chemically and thermally modified pine wood, *J. Coat. Technol. Res.*, **4** (2), 203-206 (2007).

11. 長澤良一: 建築塗装における木部の水性化, *塗装工学*, **48** (11), 518-525 (2013).

12. 片岡厚: 木材の組織構造を区別した赤外分光分析—顕微 FT-IR の有用性と応用例—, *木材保存*, **26** (6), 255-265 (2000).

13. (財)日本塗料検査協会: “塗料用合成樹脂の赤外線吸収スペクトル集”, 2004.

14. 小林正彦, 久保智史, 木口実, 片岡厚, 松永正弘, 川元スミレ, 大友祐晋: 示差走査熱量法および赤外分光法による木材—プラスチック複合材料 (混練型 WPC) の定量分析, *木材保存*, **39**(1), 7-15 (2013).

15. 松浦力: 脂肪族ポリカーボネート樹脂を用いた木材の高耐候性塗装—顔料, 紫外線吸収剤, 膜厚の効果—*塗装工学*, **35** (1), 4-10 (2000).

16. 伊佐治信一, 平林靖: 水性木部用塗料の凍結融解に対する抵抗性, *木材保存*, **40**(4), 170-178 (2014).

17. 片岡厚, 石川敦子, 小林正彦, 伊神裕司, 松村ゆかり, 松永浩史, 松永正弘, 神林徹, 木口実: 木材保護塗料の耐候性能向上に及ぼす素地粗面化処理の影響, *木材保存*, **42** (1), 18-25 (2016).

18. 日本工業規格: 塗料一般試験方法—第7部: 塗膜の長期耐久性—第6節: 屋外暴露耐候性, JIS K-5600-7 -6(2002).

19. 気象庁: 過去の気象データ・ダウンロード,
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (2018年11月5日参照) .

20. 公益財団法人 日本住宅・木材技術センター: “木材保護着色塗料品質評価マニュアル”, 1998.

21. 片岡厚: 木材の気象劣化と表面保護-気象劣化のメカニズム-, *木材保存*, **43** (2), 58-68 (2017).

22. 矢田茂樹：外装木材の初期劣化とその抑制, 木材保存, **42** (3), 127-131 (2016).
23. Nuopponen, M., Wikberg, H., Vuorinen, T., Maunu, L. S., Jämsä, S., Viitaniemi, P. :
Heat-Treated Softwood Exposed to Weathering, *Journal of Applied Polymer Science*,
91, 2128-2134(2004) .
24. Jämsä, S., Ahola, P., Viitaniemi, P. : Long-term natural weathering of coated
ThermoWood, *Pigment and Resin Technology*, **29**(2), 68-74 (2000).
25. Jämsä, S., Ahola, P., Viitaniemi, P. : Performance of coated heat-treated wood,
Surface coatings International, **6**, 297-300(1999).
26. Meijer, M. de, Thurich, K., Militz, H.: Comparative study on penetration
characteristics of modern wood coatings, *Wood Science and Technology*, **32**, 347-365
(1998).
27. Meijer, M. de, Thurich, K., Militz, H.: Wet adhesion measurements of wood
coatings, *Holz als Roh- und Werkstoff*, **56**, 306 (1998).
28. 川村二郎：木材塗装における塗膜割れ, 色材協会誌, **55** (7), 488-498 (1982).
29. Shcupakivskyy, R., Clauder, L., Linke, N., Pfriem, A.: Application of high-
frequency densitometry to detect changes in early- and latewood density of oak
(*Quercus robur* L.) due to thermal modification, *European Journal of Wood and Wood
Products*, **72**, 5-10(2014).
30. Bardage, S. L, Bjurman, J.: Adhesion of waterborne paints to wood, *Journal of
Coating Technology*, **70**(878), 39-47(1998).
31. 江部憲一, 片岡厚, 木口実：表面粗さ測定を用いた塗装木材の耐候性評価,
木材保存, **37** (3), 122-129 (2011).
32. Williams, R. S.: Effect of dilute acid on accelerated weathering of wood, *Journal of
the air and waste management association*, **38**, 148-151 (1988).

33. 木口実：木材の気象劣化と耐候処理 1. 木材の劣化気象因子と劣化機構，木材保存，**19** (6), 262-271 (1993).
34. Shell, J., Feist, W. C.: Role of density in the erosion of wood during weathering, *Forest Product Journal*, **36**, 57-60 (1986).
35. Kataoka, Y., Kiguchi, M., Fujikawa, T., Evans, P. D.: The effects of within-species and between-species variation in wood density on the photodegradation depth profiles of sugi (*Cryptomeria japonica*) and hinoki (*Chamaecyparis obtusa*): *Journal of Wood Science*, **51**, 531-536 (2005).
36. Boonstra, M. J., Acker, J. van, Kegel, E., Stevens, M.: Optimisation of a two-stage heat treatment process: durability aspects, *Wood Science and Technology*, **41**, 31-57 (2007).
37. 公益財団法人日本住宅・木材技術センター：優良木質建材等の品質性能評価基準, <https://www.howtec.or.jp/files/libs/2334/201808231717569934.pdf> (2018 年 11 月 5 日参照) .